



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

NÁVRH A REALIZACE USB OSCILOSKOPU

DESIGN AND FABRICATION OF USB OSCILLOSCOPE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Daněk

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.

BRNO 2020

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav mikroelektroniky

Student: Martin Daněk

ID: 203401

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Návrh a realizace USB osciloskopu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je sestavit galvanicky oddělený USB osciloskop na bázi mikrokontroléru STM32 vč. aplikace pro PC. Osciloskop bude mít dva kanály, každý alespoň 14 MSps, a dále digitálně řízené rozsahy, AC/DC vazbu a trigger pro náběžnou a sestupnou hranu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 8.6.2020

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Cílem bakalářské práce je zkonstruovat jednoduchý dvoukanálový USB osciloskop. Nejdříve je popsána základní teorie a konstrukce osciloskopů a rozebrány jejich nejdůležitější parametry. Dále je analyzován výběr několika existujících projektů a vyhodnoceny výhody a nevýhody jejich zapojení. Následně je navrženo blokové i kompletní elektronické schéma a zdůvodněna volba komponent. Nakonec je provedeno měření a vyhodnocení dosažených parametrů osciloskopu.

KLÍČOVÁ SLOVA

ARM, STM32, osciloskop, USB, laboratorní přístroj, mikrokontrolér

ABSTRACT

The goal of the bachelor's thesis is to develop and fabricate a simple two channel oscilloscope. A basic theory and construction of oscilloscopes is described first and their most important parameters discussed. Next, a couple of existing projects are analyzed, and the advantages and disadvantages of their construction are evaluated. Then a block and complete electronic scheme are presented and component choice is discussed. Finally, the product of this thesis is measured and the achieved parameters are evaluated.

KEYWORDS

ARM, STM32, oscilloscope, USB, lab equipment, microcontroller

DANĚK, Martin. *Návrh a realizace USB osciloskopu*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/127038>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Jiří Háze.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: Martin Daněk

VUT ID studenta: 203401

Typ práce: Bakalářská práce

Akademický rok: 2019/20

Téma závěrečné práce: Návrh a realizace USB osciloskopu

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Novém Městě na Moravě dne: **27. května 2020**

.....
Podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Jiřímu Házemu, Ph.D., za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování této práce.

OBSAH

Úvod	1
1 OSCILOSKOPY	2
1.1 Historie.....	2
1.2 Digitální osciloskopy	2
1.3 Vstupní analogová část	3
1.3.1 Sondy	3
1.3.2 Volič vazby	5
1.3.3 Volič vstupní impedance	5
1.3.4 Vstupní dělič a zesilovač	5
1.4 Převodník AD a paměť	6
1.4.1 Komparační převodníky AD.....	6
1.4.2 Převodníky AD s postupnou aproximací	7
1.4.3 Sigma-delta převodníky AD	8
1.4.4 Paměť	8
1.5 Spouštění.....	9
1.6 Uživatelské rozhraní	10
1.7 Parametry číslicových osciloskopů.....	12
1.7.1 Šířka pásma.....	12
1.7.2 Snímkovací frekvence.....	12
1.7.3 Počet kanálů.....	13
1.7.4 Hloubka paměti.....	13
1.7.5 Vertikální rozlišení převodníku AD	13
1.7.6 Vstupní rozsahy citlivosti	14
2 ANALÝZA EXISTUJÍCÍCH ŘEŠENÍ	15
2.1 Projekt „MiniScope“	15
2.2 Osciloskop DSO138	17
2.3 Projekt „DPScope II“	18
2.4 Projekt „ScopeFun“	19

3	BLOKOVÉ SCHÉMA VLASTNÍHO ŘEŠENÍ	21
3.1	Mikrokontrolér STM32F303CCT6.....	21
3.1.1	Převodníky AD	22
3.2	Vstupní analogová část	23
3.3	Spouštění.....	24
3.4	Generování vzorkovacích impulsů a vzorkování	24
3.5	Komunikační rozhraní	25
3.6	Napájení.....	25
3.7	Generátor průběhů	25
4	REALIZACE	27
4.1	Volba součástek	27
4.1.1	Mikrokontrolér a napájení	27
4.1.2	Generátor libovolných průběhů	28
4.1.3	Operační zesilovač s nastavitelným zesílením.....	28
4.1.4	Vstupní analogová část	29
4.2	Výroba DPS	31
4.3	Firmware pro mikrokontrolér	32
4.3.1	Řízení převodu AD	33
4.3.2	Spouštění.....	34
4.3.3	Generátor libovolných průběhů	34
4.3.4	Komunikace s řídicím PC	36
5	OVLÁDACÍ SOFTWARE	37
5.1	Aplikace verze 0.1	37
5.2	Aplikace verze 0.2	37
5.3	Funkce.....	40
5.3.1	Připojení osciloskopu.....	40
5.3.2	Nastavení osciloskopu	40
5.3.3	Kurzory	41
5.3.4	Generátor průběhů	41
6	OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI	42
6.1	Osciloskop	42
6.2	Generátor průběhů	44
6.3	Dosažené parametry zařízení	45

7 Závěr	47
Literatura	48
Seznam obrázků	50
Seznam tabulek	51
A Návrh zařízení	52
A.1 Obvodové zapojení řídicího modulu.....	52
A.2 Deska plošného spoje – top (strana součástek).....	54
A.3 Deska plošného spoje – bottom (strana spojů)	55
B Seznam součástek	56

ÚVOD

Jedním ze základních nástrojů pro vývoj, testování a výrobu elektroniky je zcela jistě osciloskop. Dnešní osciloskopy dosahují šířky pásma v řádu stovek MHz, ale stojí běžně desítky tisíc korun. Takové zařízení je ale zbytečně rychlé a drahé pro studenty či začátečníky, kteří se teprve chtějí začít elektrotechnice věnovat. Naprostá většina signálů se u jednodušších pokusů či platforem jako např. Arduino pohybuje pod 1 MHz.

Cílem této práce je tedy zkonstruovat jednoduchý dvoukanálový USB osciloskop, který bude použitelný právě pro takovéto jednodušší aplikace. Součástí osciloskopu bude i jednoduchý generátor průběhů a PC aplikace pro Windows. Důraz bude kladen na cenu, celkové rozměry a uživatelskou přívětivost. Z tohoto důvodu jsou maximálně využity periferie mikrokontroléru STM32F303, který je jádrem celého zařízení.

V první kapitole jsou rozebrány základní části osciloskopu a jejich nejdůležitější parametry. V druhé kapitole je provedena analýza a zhodnocení čtyř vybraných existujících osciloskopů. V třetí kapitole je navrženo blokové schéma a popsány periferie mikrokontroléru STM32F303. Ve čtvrté kapitole je zdůvodněna volba nejdůležitějších součástí a popsána samotná realizace zařízení. V páté kapitole je popsána tvorba ovládací aplikace pro PC. V šesté kapitole byly ověřeny nejdůležitější parametry zkonstruovaného zařízení.

1 OSCILOSKOPY

Osciloskop je definován jako elektronický přístroj, sloužící k zobrazování průběhů měřeného signálu. Výstupem osciloskopu je obvykle graf závislosti napětí na čase, na základě kterého může uživatel zhodnotit samotný průběh napětí či vyčíslit veličiny jako např. amplitudu, frekvenci, zkreslení atd.

1.1 Historie

První skutečný osciloskop, založený na technologii CRT (Cathode Ray Tube) zkonstruoval Jonathan Zenneck již v roce 1899. Funkční princip těchto prvních osciloskopů byl jednoduchý – signál se přiváděl na cívky vertikálního vychylování, zatímco na cívky horizontálního vychylování se přiváděl pilový průběh. S mnohými vylepšeními (vertikální citlivost, spuštění, ...) se tato technologie využívala hojně až do začátku 21. století.

V roce 1971 firma LeCroy představila první digitální osciloskop, který dokázal uložit 20 vzorků s rozmezím 1 ns. Poté se špičkou ve vývoji stala firma HP (dnes Keysight Technologies), která jako první představila skutečný DSO (Digital Storage Oscilloscope), a již v roce 1992 představila první 100MHz digitální osciloskop, který byl schopen cenově konkurovat 100MHz analogovému osciloskopu.

Velkou nevýhodou DSO byla zpočátku vysoká cena obrazovek, kterou se některé firmy snažily řešit připojením osciloskopu k počítači – v roce 1991 takovýto osciloskop představila firma Pico Technology (připojoval se k paralelnímu portu a měl jediný kanál 10 kSps), o dva roky později se přidaly firmy LeCroy a HP s podobnými zařízeními.

1.2 Digitální osciloscipy

Výhody digitálního oproti analogovému osciloskopu jsou stejné jako u ostatní elektroniky – možnost velmi jednoduše dále zpracovávat, analyzovat a ukládat data, mnohem větší flexibilita a mnohem snazší integrace do automatizovaných testovacích systémů. Digitální osciloscipy je možno rozdělit do třech skupin:

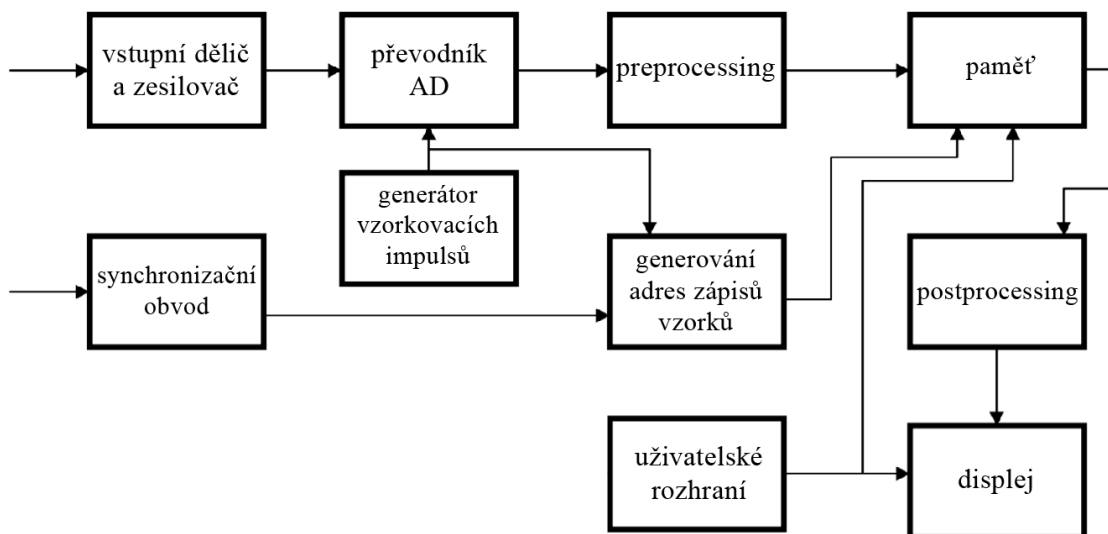
- DSO (Digital Storage Oscilloscope), někdy též nazývané jako RTS (Real Time Oscilloscope). Tyto osciloscipy po spouštěcím pulzu uloží do paměti určitý počet vzorků, pomocí kterých poté vykreslí jeden určitý průběh. Jelikož běžné DSO osciloscipy obsahují převodníky AD se vzorkovací frekvencí jednotek až stovek GSps, je možno při dodržení Shannon-Nyquistova teorému snímkovat signály s frekvencí až desítky GHz. Tento typ osciloskopu je v současné době nejrozšířenější.
- ETSO (Equivalent Time Sampling Oscilloscope), někdy též Digital Sampling Oscilloscope, slouží k zobrazení opakujících se průběhů. Tyto osciloscipy získají dostatečný počet vzorků navzorkováním několika period signálu (který tedy musí být periodický). Díky tomu je možné zobrazovat

signály s mnohem vyššími frekvencemi než je frekvence vzorkovací.

- MSO (Mixed Signal Oscilloscope) – v dnešní době se velmi často analyzují i digitální průběhy, tyto osciloskopy mají kromě několika analogových kanálů i více (obvykle 8–32) digitálních kanálů a umožňují analýzu protokolů, jedná se tedy o hybrid osciloskopu a logického analyzátoru.

Bez ohledu na výše zmíněný typ se každý digitální osciloskop skládá z

- vstupní analogové části včetně sond,
- převodníku AD a paměti,
- mechanismu spouštění,
- uživatelského rozhraní (UI – User Interface), sloužícího k nastavování osciloskopu a práci se signálem (měření průběhů, ať už automatizované nebo pomocí kurzorů, ukládání atd.)



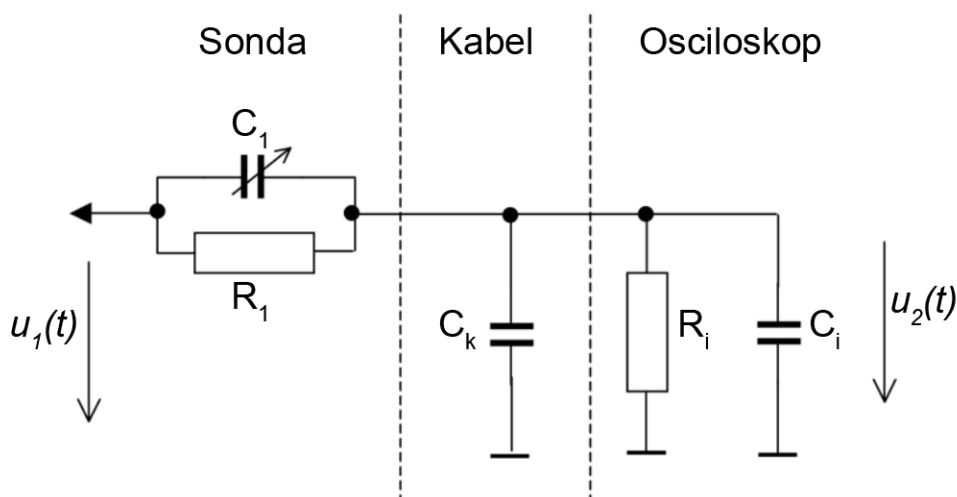
Obrázek 1 Blokové schéma osciloskopu [1]

1.3 Vstupní analogová část

Vstupní analogová část, často nazývaná jako AFE (Analog Front End) je obvykle jedna na každý kanál.

1.3.1 Sondy

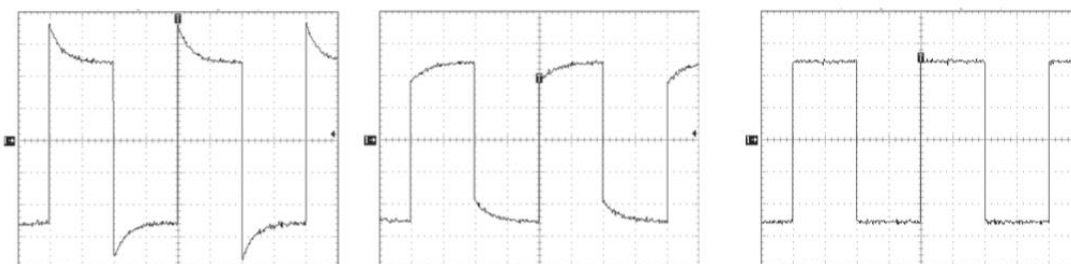
Často opomíjenou, byť extrémně podstatnou součástí každého osciloskopu i měření jsou měřicí sondy. Nejrozšířenější jsou pasivní napěťové sondy, které fungují jako frekvenčně kompenzovaný napěťový dělič – jedná se tedy o rezistor s paralelně zapojeným kapacitorem.



Obrázek 2 Dělič na vstupu osciloskopu [1]

Jelikož hodnoty C_k a C_i nejsou obvykle přesně známy, používá se jako C_1 trimovací kapacitor, jehož kapacitu je možné pomocí šroubováku nastavit. Většina osciloskopů proto poskytuje vývod s 1kHz obdélníkovým průběhem, pomocí kterého je možno přesně nastavit kapacitor tak, aby nedocházelo ke zkreslení signálu. Při správné hodnotě C_1 musí platit, že

$$R_1 \cdot C_1 = R_i \cdot (C_i + C_k). \quad (1)$$



Obrázek 3 Vlevo překompenzovaná sonda, uprostřed nedostatečně kompenzovaná sonda a vpravo ideální průběh [2]

Naprostá většina sond dále obsahuje přepínač mezi dělením 1:1 a 1:10. Sondy 1:1 nemají rezistor R_1 , u sond 1:10 je hodnota $R_1 = 9 \text{ M}\Omega$. Často opomíjenou výhodou sond 1:10 je, vyjma zvýšení možného napětí na vstupu i zvýšení vstupní impedance vstupu. V případech, kdy jsou měřeny citlivé vysokoimpedanční signály (například rezistorové děliče), je možno zabránit zkreslení využitím sondy 1:10 a poté zesílením signálu v osciloskopu.

Další typ sond jsou aktivní napěťové sondy. Jak už název napovídá, tyto sondy vyžadují externí napájení a jsou mnohem složitější, tedy i dražší. Na druhou stranu mají ale velmi vysokou vstupní impedanci, nastavitelný stejnosměrný posun (což umožňuje měření malých střídavých signálů superponovaných na stejnosměrné složce), větší šířku

pásma a jsou k dispozici i v diferenciálních variantách, což umožňuje měřit neuzemněné signály. Jejich velmi vysoká vstupní impedance a malá vstupní kapacita pramení z toho, že na vstupu je obvykle gate tranzistoru typu FET. S těmito sondami je možno měřit i extrémně citlivé obvody, například piezoelektrické krystaly.

Další využívaný typ sond jsou sondy proudové. Proud je možno měřit i pomocí úbytku napětí na rezistoru, ale takovéto měření by vyvolávalo spoustu negativních jevů, proto se obvykle využívá bezkontaktního proudového měření, založeného na Hallově jevu (umožňuje měření SS i ST do cca 100 kHz) či cívek, na kterých je indukováno napětí dle Faradayova zákona o elektromagnetické indukci (umožňuje měření pouze ST proudů s frekvencí od cca 10 Hz).

Mimo výše zmíněné typy existuje ještě spousta dalších, specifických sond – například vysokonapěťové, optické, teplotní a další.

1.3.2 Volič vazby

Volič vazby umožňuje volit mezi SS nebo ST vazbou. Při SS vazbě je vstupní signál ze sondy přiváděn přímo na vstupní impedanci.

Při ST vazbě se ihned po vstupním BNC konektoru předradí sériový kapacitor, který na vstupu vytvoří filtr CR. Tento filtr poté zabráni SS složce ve vstupu do vstupních děličů a zesilovačů. Takovýto režim je výhodný, pokud je například třeba zobrazit zvlnění 12V napájecí větve – v SS režimu by bylo nutno použít citlivost 5 V/div, ale při takovéto citlivosti nepůjde vidět žádné detaily. V případě přepnutí do ST vazby bude možno použít mnohem vyšší citlivost (například 200 mV/div), což umožní zobrazit mnohem více detailů sledovaného průběhu.

1.3.3 Volič vstupní impedance

Některé osciloskopy mají možnost měnit vstupní impedanci a místo standardního 1 M Ω zvolit 50 Ω . Důvodem je zamezení vzniku stojatých vln – pokud v daném systému má výstup (například generátor funkcí) výstupní odpor 50 Ω , přenosové médium také a měřicí přístroj (v tomto případě osciloskop) také, nedojde ke vzniku stojatých vln a veškerá energie každé vlny bude pohlcena měřicím přístrojem. Pokud bude impedance prvků obvodu různá, dojde k částečnému či úplnému odrazu vlny, která se poté může superponovat na další přicházející vlnu a vytvářet tak šum, který zkreslí měření.

U 50 Ω terminace je často omezena maximální efektivní hodnota napětí z důvodu možného přehřátí 50 Ω rezistoru.

1.3.4 Vstupní dělič a zesilovač

Většina osciloskopů dovoluje na vstupní svorky přivést signál až ± 300 Vpp, což je ale samozřejmě příliš mnoho pro jakýkoliv převodník AD. Zároveň ale uživatel může chtít měřit signály s amplitudou pouze 200 mV. Signál je proto přiveden na soustavu elektronicky či mechanicky nastavitelných děličů a zesilovačů, které signál upraví do dynamického rozsahu akceptovatelného převodníkem AD.

Je obvyklé udávat dynamický rozsah ve vertikální citlivosti na část obrazovky – analogové osciloskopy neměly kurzory a jedinou možností, jak změřit hodnotu napětí,

byla mřížka nakreslená na obrazovce. Tato mřížka měla obvykle 10x10 čtverců a citlivost se udávala na jeden čtverec pro snazší výpočty, tedy například 1 V/div (division, rozdělení, potažmo čtverec), apod. Pokud tuto hodnotu vynásobíme počtem čtverců na obrazovce, získáme celkový vstupní rozsah.

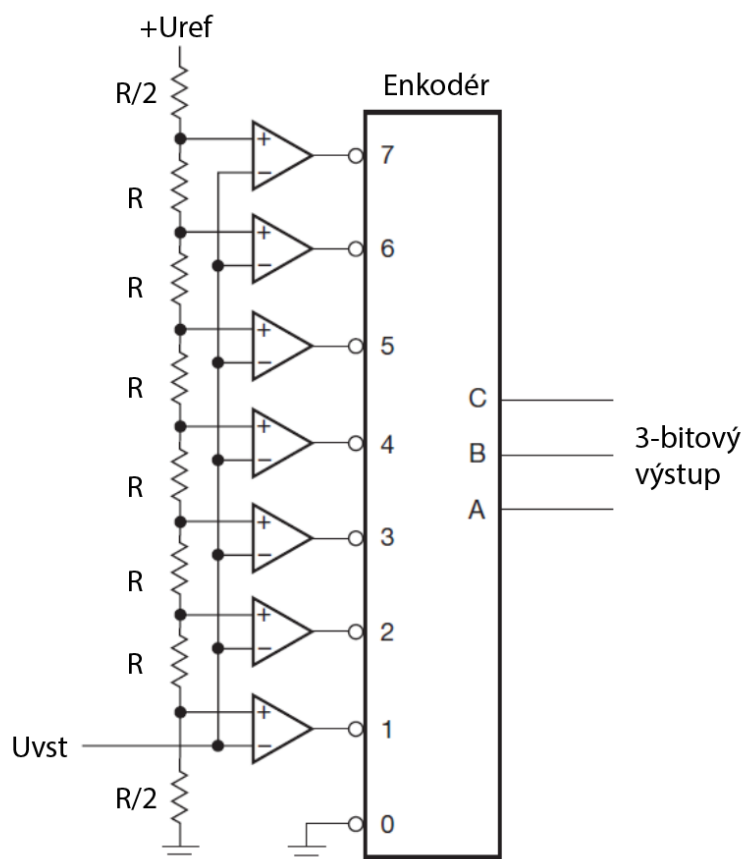
1.4 Převodník AD a paměť

Převodník AD a paměť jsou klíčovými komponentami každého osciloskopu, neboť ovlivňují

- vertikální rozlišení kanálů, resp. rozlišení převodníku AD,
- vzorkovací frekvenci, nepřímo i šířku pásma,
- hloubku paměti a schopnost osciloskopu uložit daný počet vzorků.

1.4.1 Komparační převodníky AD

Komparační převodníky (někdy též nazývané flash převodníky) se v osciloskopech využívají nejčastěji z důvodu jejich vysoké rychlosti. Skládají se z několika komparátorů, na jejichž neinvertující vstup je současně přiveden měřený signál. Invertující vstupy jsou napojeny na jednotlivé uzly v sérii dělicích rezistorů, které na nich vytvoří sérii ekvivalentně vzdálených referenčních napětí. Výstupy komparátorů jsou napojeny na prioritní enkodér, který výsledek převede na binární kód.



Obrázek 4 3bitový paralelní komparační převodník AD [3]

Díky jednoduchosti tohoto zapojení dosahují převodníky AD komparačního typu velmi vysokých rychlostí, běžně desítky GSps. Obrovskou nevýhodou je však potřebný počet komparátorů n , vyjádřený rovnicí

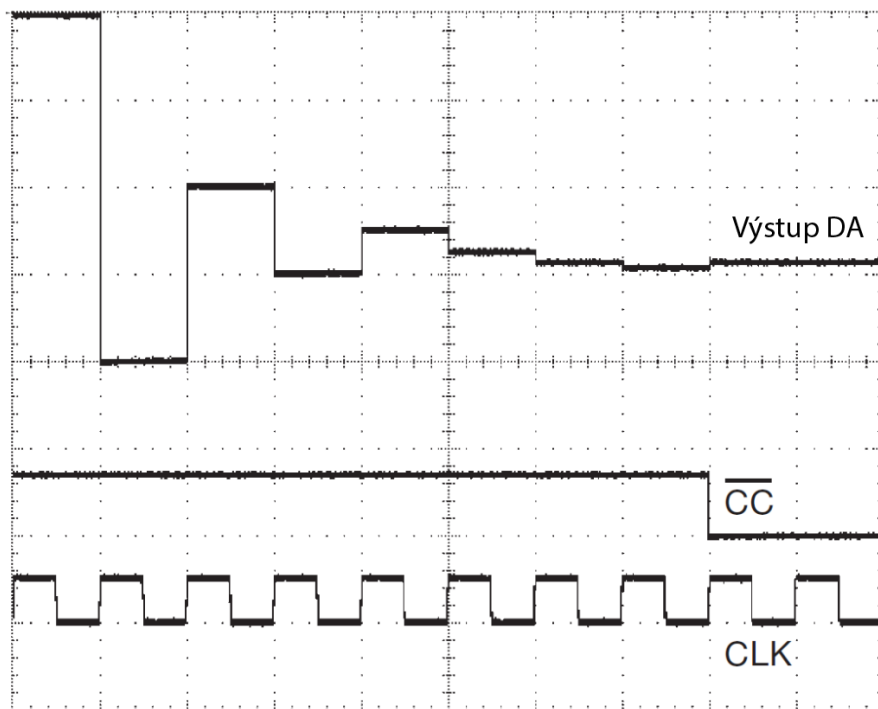
$$n = 2^r - 1, \quad (2)$$

kde r je požadované rozlišení.

Z tohoto důvodu se tyto převodníky prakticky vyrábějí s rozlišením maximálně 8 až 10 bitů. Existují i upravené verze, např. s postupnou komparací, které redukuje vyžadovaný počet komparátorů na úkor rychlosti.

1.4.2 Převodníky AD s postupnou aproximací

Tyto převodníky (někdy zkráceně označované jako SAR – Successive Approximation) obsahují pouze jeden komparátor, jeden převodník digitálně-analogový (DA) a datový registr. Na počátku operace se všechny bity registru nastaví na 0, a poté se postupně jeden po druhém nastavují od MSB (Most Significant Bit) na 1. Výsledek registru se propisuje do převodníku DA a jeho výstup je porovnán komparátorem s měřenou hodnotou. Pokud výstup převodníku DA nepřesahuje vstupní hodnotu, bit je ponechán jako 1, jinak je nastaven na hodnotu 0.



Obrázek 5 Postupně konvergující výstup převodníku DA, signál Conversion Complete a časovací signál u SAR převodníku AD [3]

Díky této postupné aproximaci je pro jednu konverzi potřeba mnohem více času než u komparačních převodníků AD. Na druhou stranu je možno dosáhnout mnohem vyšších přesností za nižší cenu – obvyklé SAR převodníky AD dosahují přesností 10 až 18 bitů a rychlostí až jednotek MSps.

1.4.3 Sigma-delta převodníky AD

Sigma-delta (někdy též označované jako delta-sigma, Δ - Σ či Σ - Δ) převodníky nabízí nejvyšší rozlišení, velmi dobrou linearitu a přirozenou imunitu vůči šumu. Toto je ale vykoupeno velmi nízkou vzorkovací frekvencí, která se, vyjma specializovaných aplikací, pohybuje pouze v řádech maximálně stovek kps. Z tohoto důvodu se v osciloskopech téměř nevyužívají, ale zato tvoří jádro většiny kvalitních multimetrů či audio převodníků AD.

1.4.4 Paměť

Naprostá většina osciloskopů po převedení signálu do digitální domény tento signál ukládá do volatilní vysokorychlostní paměti typu FIFO (First In First Out – tj. první data, která jsou do paměti uložena, se jako první objeví na výstupu). Po zaplnění paměti začne mnohem pomalejší mikroprocesor osciloskopu data zpracovávat a vykreslovat na obrazovku či odesílat do PC přes USB. Délka průběhu t v sekundách, kterou je schopen daný osciloskop zachytit, je vyjádřena rovnicí

$$t = \frac{n}{f}, \quad (3)$$

kde f je frekvence snímkování a n hloubka paměti.

Z tohoto vyplývá, že se zvyšující se snímkovací frekvencí je nutno mít k dispozici větší hloubky paměti, aby bylo možno zachytit stejně dlouhý průběh. Hloubka paměti se v dnešních osciloskopech značně liší, od 10 kpts (kilopoints, tj. tisíc bodů) až do 1 Gpts.

Ne vždy je ale větší hloubka paměti výhodou – v některých případech může větší hloubka paměti, tj. větší množství dat, které musí procesor zpracovat, zpomalit frekvenci, s jakou osciloskop zobrazuje data uživateli na obrazovce.

1.5 Spouštění

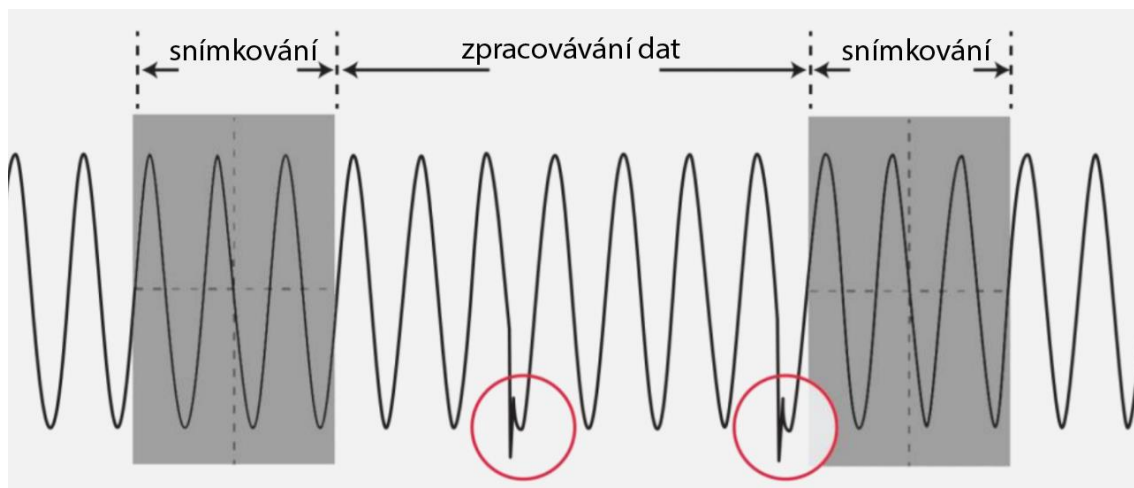
Osciloskopy často vytvářejí miliardy jednotlivých vzorků každou vteřinu, nicméně pouze zlomek těchto vzorků je skutečně zobrazen uživateli. Některé osciloskopy skutečně spouštějí převodník AD až při spouštěcím pulzu, obvyklejší ale je, že převodník AD běží konstantně a neustále odesílá data do paměti, která se dokola přepisuje. Spouštěcí pulz zabrání dalšímu přepsání dat, což prakticky umožňuje si zobrazit průběh i před samotným spouštěcím pulzem, což je jedna z největších výhod digitálních osciloskopů oproti analogovým. Existuje několik zdrojů spouštěcího pulzu, jmenovitě

- interní spouštění – spouští se pomocí dat na jednotlivých kanálech, je možno spouštět vůči rostoucí/klesající hraně, úrovni, pulzu apod.,
- digitální spouštění – spouští se pomocí dat digitálních kanálů (pouze u MSO), buďto spouštěcí signál reaguje na kombinaci digitálních kanálů či na určitou sekvenci dat například na sériové lince,
- externí spouštění – některé osciloskopy umožňují přivést externí pulz na speciální vstup, který zahájí spouštění, toto je užitečné pro synchronizaci s ostatními přístroji (generátor průběhů apod.).

Osciloskop může pracovat v režimu

- normálním, kde se snímkuje s nejvyšší možnou frekvencí a nečeká se na signál spouštění,
- automatickém, kde osciloskop čeká na signál spouštění, po něm provede snímkování a zobrazení průběhu a po dalším signálu spouštění ihned provádí další snímkování,
- jednotlivém (single), který je stejný jako automatický režim, ale nasnímkuje se pouze jeden průběh a poté obrazovka „zamrzne“, dokud uživatel nedá instrukci pokračovat dále.

Negativním jevem, který se přirozeně vyskytuje u všech osciloskopů, je tzv. Dead Time („mrtvý čas“, někdy též Blind Time, „slepý čas“). Po dokončení snímkování osciloskopu nějaký čas trvá, než uložená data zpracuje a vykreslí na obrazovce a zahájí další snímkování. Pokud v tomto čase proběhne například nějaký impulz či jiný nežádoucí jev, neuvidíme jej, jelikož osciloskop byl zrovna zaneprázdněn vyhodnocováním dat.



Obrázek 6 Efekt "mrtvého času" u digitálního osciloskopu [4]

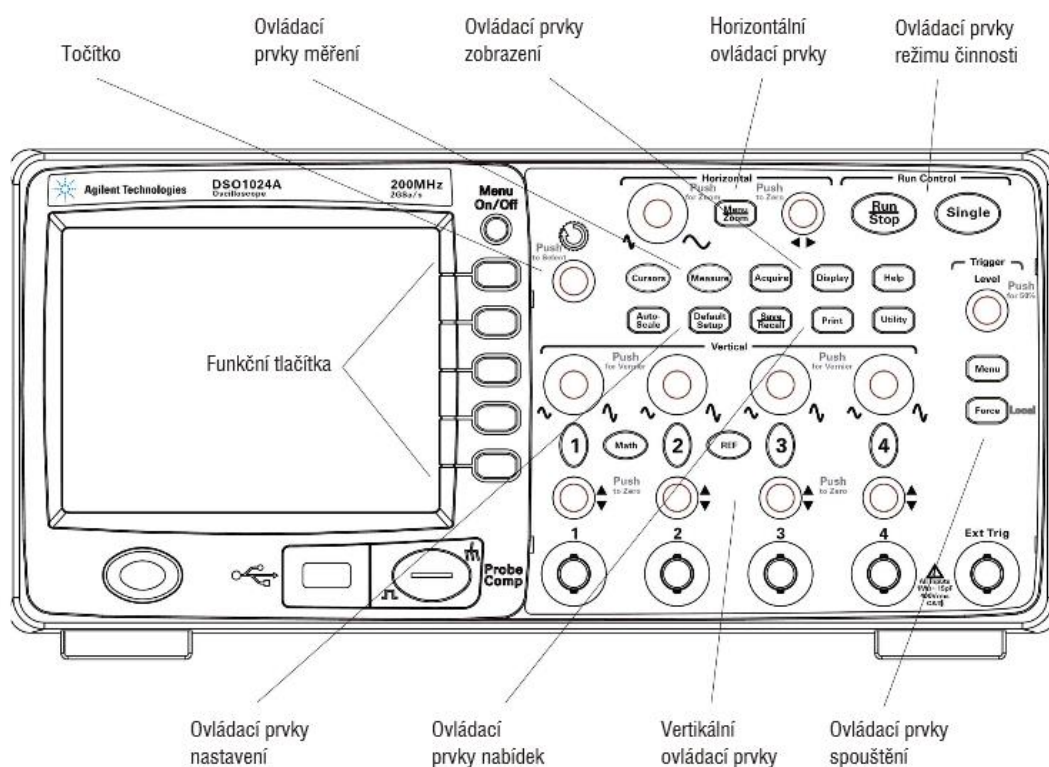
1.6 Uživatelské rozhraní

Zatímco parametry popsanych předchozích částí určují, jaké signály je vůbec možno zachytit, uživatelské rozhraní určuje, jak složitá bude interpretace a práce se zachycenými daty. Jedná se proto taktéž o velmi podstatný parametr každého osciloskopu. Data z osciloskopu se dají

- zobrazit na LCD obrazovce (dříve CRT), integrované do samotného osciloskopu (tato varianta je často označována jako stolní či standalone osciloskop),
- přenést do počítače a jejich zobrazit (popř. zpracovat) na obrazovce počítače (často označováno jako USB osciloskop nebo PC-based).

Některé velmi drahé osciloskopy jsou de facto plnohodnotný počítač, na kterém běží zjednodušená verze operačního systému (Windows, Linux).

Podobně k zadávání parametrů uživatelem mohou sloužit fyzické ovládací prvky (např. rotační enkodéry, tlačítka, přepínače), dotykové obrazovky (u novějších osciloskopů) nebo PC software.



Obrázek 7 Uživatelské rozhraní osciloskopu Agilent Technologies (dnes Keysight) DSO1024A [1]

Mezi výhody USB osciloskopů oproti stolním osciloskopům patří

- cenová efektivita – uživatel neplatí za obrazovku, tlačítka apod, za stejnou cenu tedy může dostat lepší převodník AD či více kanálů,
- rozměrová efektivita – zatímco většina stolních osciloskopů váží vyšší jednotky až desítky kilogramů a má objem několik dm³, USB osciloskopy obvykle váží stovky gramů a velikostí připomínají spíše externí pevný disk k počítači a menší velikost se také podepisuje na nižší ceně,
- přenositelnost – díky mnohem menším rozměrům je snazší přenášet USB osciloskopy, většina USB osciloskopů je také napájena pouhým USB portem, s využitím laptopu proto není problém je využívat i mimo dosah síťového připojení,
- zobrazení a práce s daty – u dnešních počítačů jsou dnes běžné obrazovky s rozlišením Full HD (1920 x 1080 px) či více a velikostí nad 13“, zatímco běžné stolní osciloskopy využívají obrazovky s rozlišením WVGA (800 x 480) a velikostí v řadech vyšších jednotek palců,
- uživatelská přívětivost – software na počítači je většinou snazší na ovládání a funkce jsou (díky větší obrazovce, klávesnici a myši) snadněji dostupné a použitelné.

Nevýhodou USB osciloskopů je

- omezené vstupní napětí – většina USB osciloskopů má omezené vstupní napětí na ± 20 Vpp, což vyžaduje použití sond 1:10 a 1:100 pro měření

- vyšších napětí,
- závislost na operačním systému, potažmo počítači – aplikace osciloskopu na hostujícím počítači bude vždy záviset na spolehlivosti OS.

1.7 Parametry číslicových osciloskopů

Využité součástky a konstrukce určují parametry, jakých daný osciloskop dosahuje.

1.7.1 Šířka pásma

Šířka pásma je nejdůležitějším parametrem jakéhokoliv osciloskopu, neboť udává, jaké frekvence je možno s daným nástrojem měřit. Fyzikálně je šířka pásma frekvence, kdy dojde k poklesu amplitudy měřeného signálu o 3 dB (tj. na 70,7 % originální hodnoty) vůči skutečnosti. Podstatné také je, že i sondy mají svoji šířku pásma, doporučuje se proto využívat sondy s šířkou pásma 1,5x vyšší než je šířka pásma osciloskopu pro zachování jeho parametrů.

Šířka pásma se udává v Hz a u běžných osciloskopů dosahuje desítek až stovek MHz.

1.7.2 Snímkovací frekvence

Snímkovací frekvence udává, kolik vzorků/snímků dokáže převodník AD maximálně převést za jednu sekundu. Udává se v Sps (Samples per second) a u běžných osciloskopů dosahuje stovky MSps až desítky GSps. Je ale nutno říci, že u většiny osciloskopů je pouze jeden převodník AD, tedy maximální snímkovací frekvence dosáhneme při využití pouze jednoho kanálu.

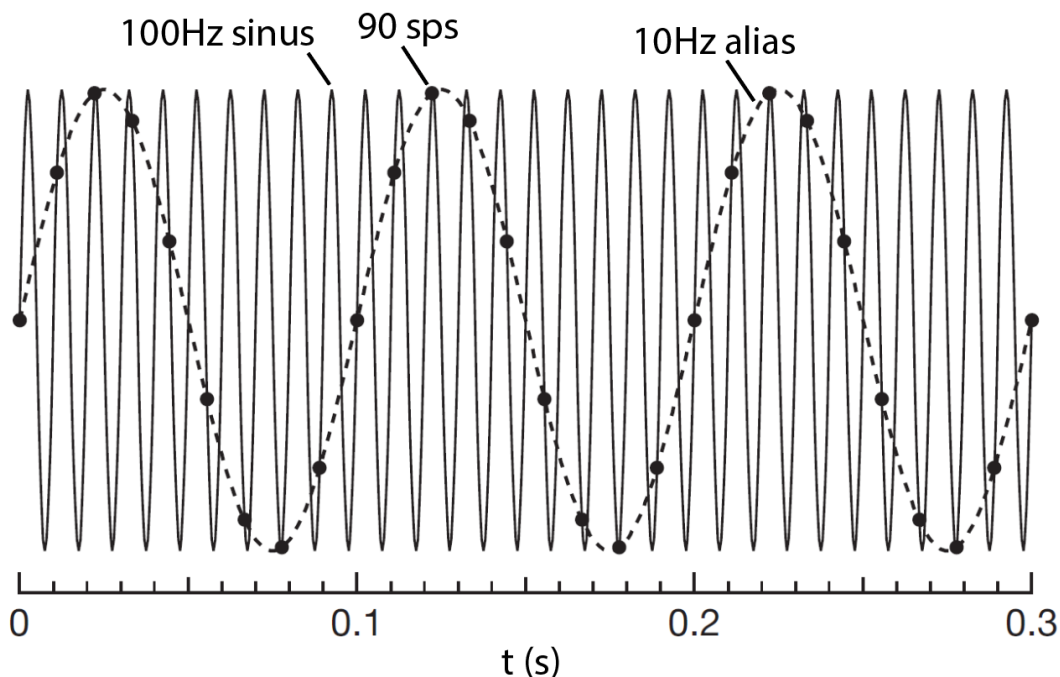
Snímkovací frekvence je obvykle násobně vyšší než šířka pásma, je totiž potřeba dodržet Shannon-Nyquistovu podmínku (někdy také nazývanou jako Shannonův teorém, Kotělníkův teorém apod.), která říká, že

$$f_V > 2 \cdot f_S, \quad (4)$$

kde f_V je vzorkovací frekvence a f_S je nejvyšší frekvence, obsažená v signálu.

Je ale potřeba si uvědomit, že např. 1MHz obdélníkový průběh má ve frekvenčním spektru nekonečně mnoho harmonických složek (v tomto konkrétním případě se vyskytuje každá lichá harmonická složka a jejich amplituda klesá s funkcí $\sin(x)/x$). Pátá harmonická složka tedy bude mít amplitudu o 27 dB nižší než základní frekvence, což už je obvykle méně, než je relativně nepřesný převodník AD osciloskopu schopen zachytit. V anglické literatuře (např. (2)) se proto velmi často mluví o „pravidlu páté harmonické“, tedy že snímkovací frekvence by měla být rovna frekvenci páté harmonické složky měřeného signálu.

Pokud by Shannonův teorém nebyl dodržen, mohlo by dojít k efektu známému jako aliasing, který způsobí extrémně nepřesnou rekonstrukci měřeného signálu, viz obrázek 8.



Obrázek 8 Výskyt aliasingu při měření 100Hz průběhu 90 snímků za sekundu [3]

Aliasing není omezen pouze na svět laboratorní techniky – v běžném životě je možno se s ním setkat například při natáčení kamerou (která natáčí s frekvencí desítky Hz) vrtulník, jehož rotor se otáčí s mnohonásobně vyšší frekvencí. Na výsledném videu se pak může zdát, že se rotor otáčí pouze několikrát za sekundu či že dokonce stojí.

1.7.3 Počet kanálů

Běžné osciloskopy disponují nejčastěji 2 nebo 4 analogovými kanály, byť existují i osciloskopy s 1 nebo 8 kanály.

U MSO osciloskopů je k dispozici vyjma několika analogových kanálů i více (8 až 32) digitálních kanálů, které slouží k analýze čistě digitálních obvodů, popř. je možno spouštět analogové snímání na určité kombinace digitálních kanálů.

1.7.4 Hloubka paměti

Paměť slouží k uložení digitálních dat, získaných převodníkem AD. Větší objem paměti znamená, že je možno uložit delší či rychleji nasnímaný průběh. Hloubka paměti se udává v pts (points, body měření) nebo S (Samples, vzorky měření) a obvykle se pohybuje od desítek kpts po stovky Mpts.

U většiny osciloskopů ale tento parametr udává celkovou paměť, o kterou se dělí všechny kanály. Při využití více kanálů najednou se tak sníží počet vzorků, které je možno uložit na jeden kanál.

1.7.5 Vertikální rozlišení převodníku AD

Jelikož osciloskopy neslouží k přesnému měření napětí (většina osciloskopů má

vertikální přesnost okolo 1 až 3 %), používají se obvykle 8bitové komparační převodníky. Software některých osciloskopů umožňuje tzv. oversampling, kdy se softwarově zvýší rozlišení na až 12 bitů za cenu snížení snímkovací frekvence).

Někteří výrobci také u osciloskopů udávají ENOB (Effective Number Of Bits, efektivní počet bitů), což je komplexní údaj, který krom rozlišení převodníku AD bere v potaz i šum, harmonické zkreslení apod. a porovnává převodník s ideálním převodníkem AD, který by měl stejné rozlišení.

1.7.6 Vstupní rozsahy citlivosti

Tento parametr udává, kolik různých kombinací vstupních děličů a zesilovačů je k dispozici, a nepřímo tedy i to, jak velké či malé signály jsme schopni měřit. Pověštinou jsou rozsahy udávány na čtverec (div, division) na obrazovce. Obvyklé jsou rozsahy od desítek mV po desítky V na čtverec.

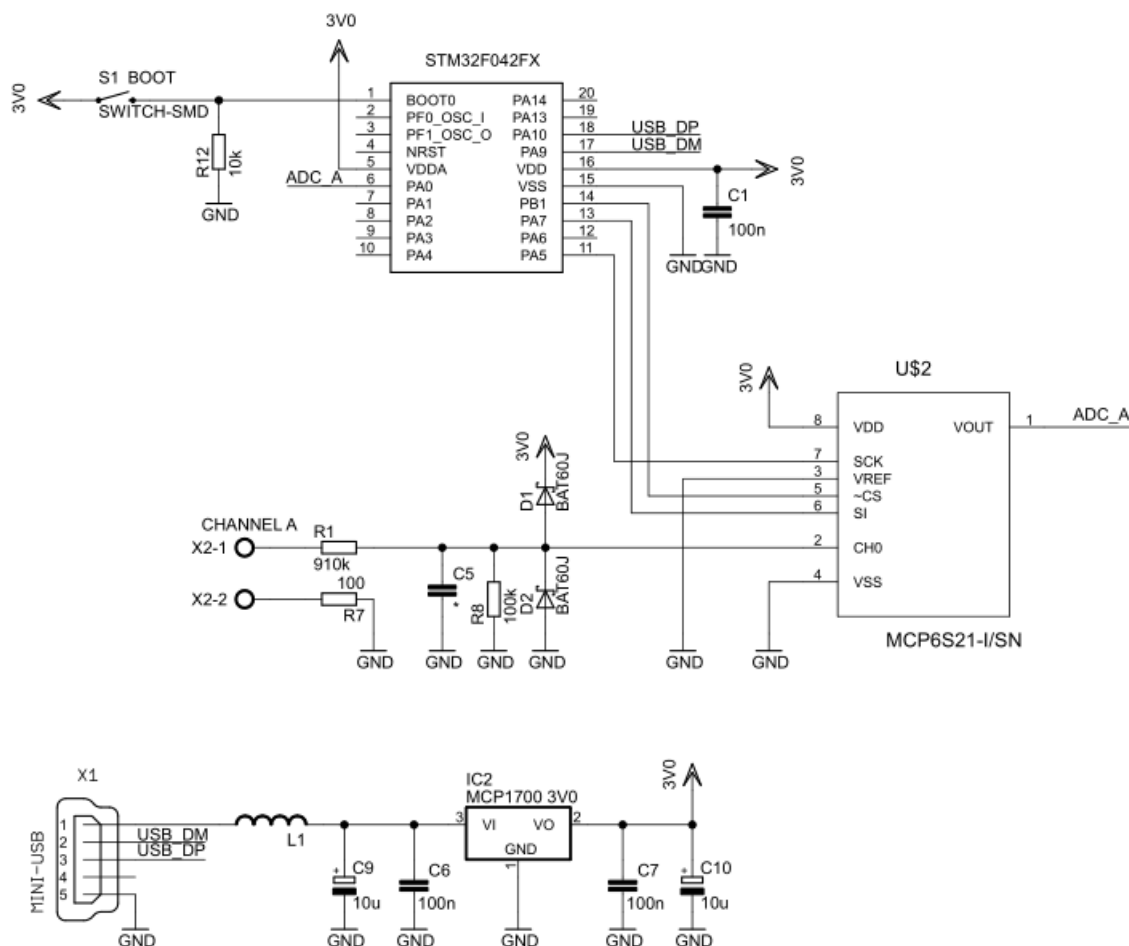
2 ANALÝZA EXISTUJÍCÍCH ŘEŠENÍ

Jak už bylo řečeno v úvodu, cílem této práce není konkurovat finálním výrobkem profesionálním USB osciloskopům od firem jako například PicoScope či Keysight, ale spíše vytvořit něco použitelného pro začátečníky či studenty, kteří do zařízení nechtějí investovat vysoké částky a zároveň obvykle pracují s platformami jako např. Arduino, kde není vyžadována velká šířka pásma.

V následující kapitole je proto proveden rozbor 4 různých existujících projektů se zaměřením na jejich analogovou vstupní část, mechanismus spouštění a ukládání navzorkovaných dat. Byly vybrány projekty přes celé spektrum cen, od 150 Kč po 17 500 Kč.

2.1 Projekt „MiniScope“

Tento extrémně jednoduchý jednokanálový osciloskop, který je možno napájet na podomácku vyrobenou DPS, má několik verzí. Všechny využívají různých mikrokontrolérů s jádrem ARM, ať už AT91SAM7 či STM32F042, a jejich interní převodník AD. Většina verzí neukládá navzorkovaná data do lokální paměti SRAM mikrokontroléru, ale ihned je odesílá přes USB rozhraní do hostujícího počítače. Díky tomu mohou sice nasnímat a uložit až miliardy snímků, ale jejich rychlost snímkování je omezena na stovky kSps (díky maximální teoretické propustnosti USB FS, která je 12 Mbps).



Obrázek 9 Schéma MiniScope verze 2f [9]

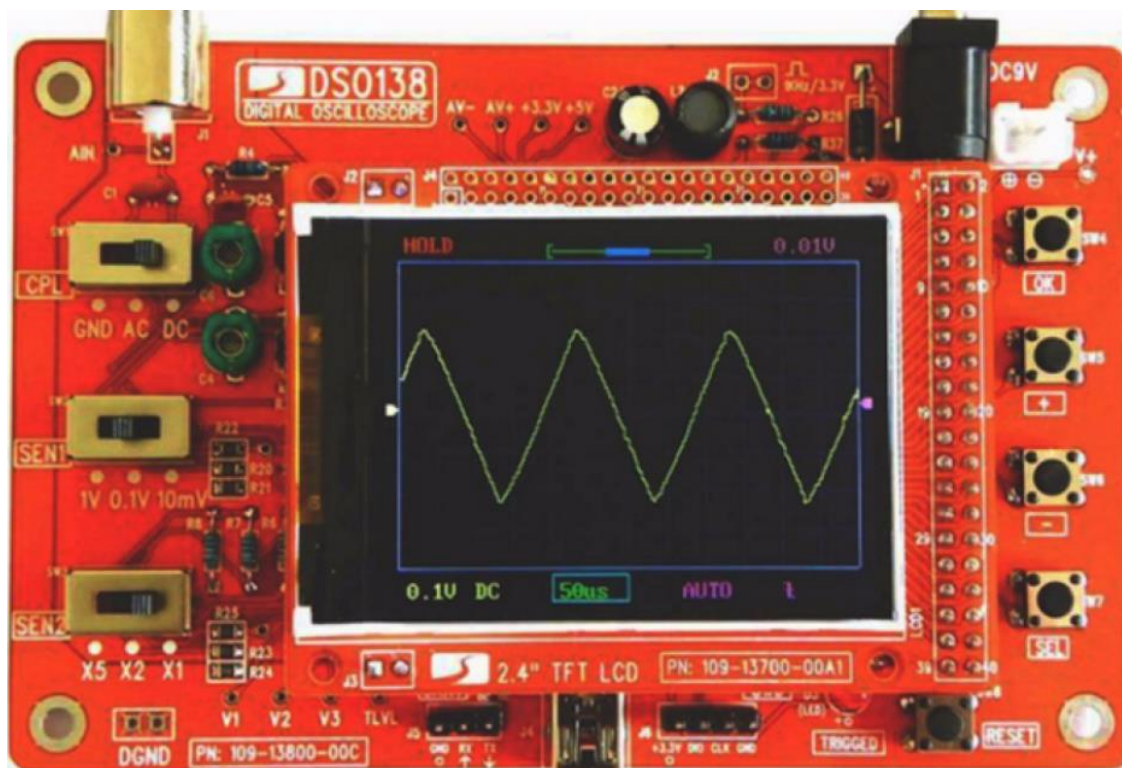
Jak je patrné i z obrázku 9, u tohoto projektu byl kladen extrémní důraz na co nejnižší počet součástek a na co největší jednoduchost. Díky tomu sice celý „osciloskop“ obsahuje pouze tři integrované obvody (mikrokontrolér, PGA zesilovač a lineární regulátor), ale má pouze jeden kanál 480 kSps s unipolárním vstupem bez možnosti volby vstupní vazby. Jednotlivé vstupní rozsahy jsou realizovány pomocí obvodu MCP6S21, což je operační zesilovač s elektronicky nastavitelným zesílením. Spouštění je pak realizováno zcela softwarově. Osciloskop taktéž není odizolován od hostujícího počítače, což prakticky znamená, že měřený obvod a počítač musí mít společnou zem a měřené napětí musí být kladné vůči zemi počítače.

Verze 2d tohoto projektu sice využívá mikrokontrolér STM32F303 (tj. stejný, který byl využit k realizaci obvodu této bakalářské práce), díky limitaci rychlosti USB je však vzorkovací frekvence opět omezena na pouhých 480 kSps a není tedy vůbec využit plný potenciál mikrokontroléru.

Celková cena součástek verze 2f je odhadována původním autorem na 6,5 \$ (cca 150 Kč).

2.2 Osciloskop DSO138

Tento malý, přenosný osciloskop, je velmi oblíbený mezi začátečníky, hlavně díky jeho příznivé ceně pouhých 390 Kč i s dopravou z čínských obchodů. Za tuto cenu dostane uživatel osciloskop s jedním kanálem s rozlišením 12 bitů, maximální vzorkovací frekvencí 1 MSps a šířkou pásma 200 kHz. Osciloskop je napájen jedním 9V akumulátorem a disponuje 2,4“ displejem. Autorem této konstrukce je čínská firma JYE Tech.



Obrázek 10 Osciloskop DSO138 [14]

Celý osciloskop je založen na mikrokontroléru STM32F103. Jeden z jeho převodníků AD je využit pro vzorkování průběhů s maximální frekvencí a tyto vzorky jsou následně ukládány do interní SRAM paměti. Vstupní signál je upravován pomocí série manuálních DP3T spínačů. Tato konstrukce je sice jednoduchá, ale umožňuje celkem 9 možných vstupních rozsahů a tři možné vazby (SS, ST, uzemnění) s plně bipolárním vstupem a analogovým spuštěním pomocí komparátoru. Všechny operační zesilovače typu TL084 mají napájení symetrickým napětím, jehož záporná větev je generována velmi jednoduchým spínaným měničem, který využívá PWM signál z mikrokontroléru.

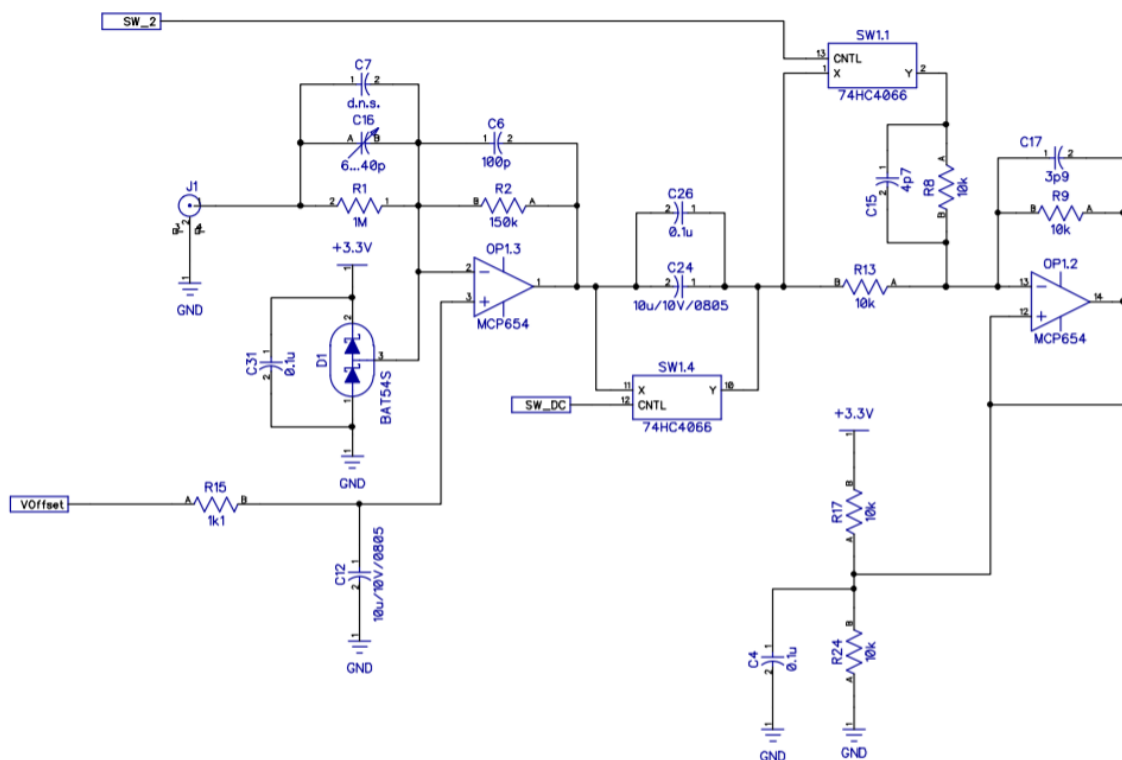
Jediná nevýhoda tohoto zařízení je jeho poměrně nízká spolehlivost a také velmi nízká obnovovací frekvence displeje, jelikož mikrokontrolér nezvládá dostatečně rychle vykreslovat displej, vyhodnocovat data a zároveň vzorkovat analogový vstup.

2.3 Projekt „DPScope II“

Oproti předchozím značně pokročilejší projekt, který originální autor nabízel k prodeji za 69 € (cca 1800 Kč). Tento osciloskop má dva vstupní kanály s volitelnou vazbou, nastavitelným SS offsetem a nastavitelným rozlišením mezi 8 a 10 bity. Jádrem osciloskopu je mikrokontrolér dsPIC33 firmy Microchip Technology, pro komunikaci na sběrnici USB je použit převodník USB-UART FT230. Ke zpracování signálu jsou vyjma pasivních součástek využity OZ MCP654 a analogové spínače 74HC4066.

Spouštění je realizováno plně analogově pomocí komparátoru, integrovaného do mikrokontroléru. Nevýhodou tohoto řešení je, že mikrokontrolér dokáže na invertující vstup přivést pouze několik určitých napětí, úrovně spouštění proto není možno nastavit plynule.

Vstupní signál (na obrázku 11 přiveden na svorku J1) je vydělen rezistorovým děličem a poté přiveden na invertující vstup prvního OZ. Na neinvertující vstup je přivedeno SS napětí, generované převodníkem DA MCP4822, které umožňuje nastavit napěťový offset a dovoluje tím pádem zaznamenávat bipolární signály. Signál poté prochází třemi zesilovacími OZ, z nichž každý může být elektronicky přemostěn, resp. jeho zesílení nastaveno na 1. Nevýhodou tohoto řešení je však fakt, že i velmi malé signály jsou vždy děleny vstupním děličem a až poté zesilovány. Díky tomu se na nich velmi projeví vstupní napěťová nesymetrie OZ či jakýkoliv šum, který může být superponován na signál a následně zesílen spolu s ním.



Obrázek 11 Vstupní analogová část projektu DPScope, včetně prvního zesilujícího OZ [12]

Osciloskop má jednoduchý kalibrační výstup s obdélníkovým průběhem a

nastavitelnou frekvencí mezi 300 kHz a 2 MHz, opět ale není galvanicky oddělen od hostujícího počítače a musí mít tedy společnou zem.

Dodávaný program na PC umí provést FFT a zobrazit spektrum signálu, dokáže fungovat jako datalogger a umí zobrazovat signály v režimu XY.

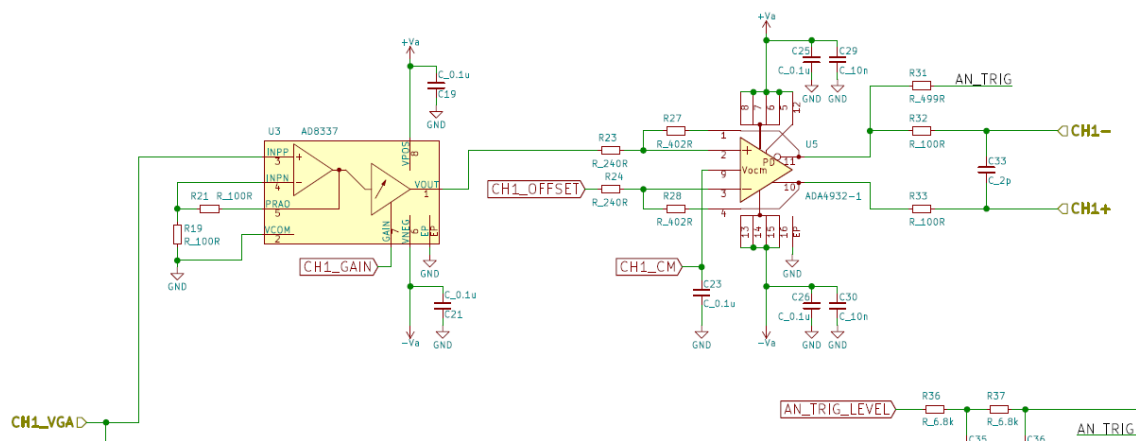
Originální autor osciloskopu se však na svých stránkách dopouští mírného klamání zákazníků – na úvodní straně [10] je zmíněno, že osciloskop má šířku pásma 2,5 MHz a vzorkovací frekvenci až 50 MSps. Pokud si však potenciální zákazník rozklikne podrobné technické specifikace [11], dozví se, že skutečná vzorkovací frekvence je pouze 2 MSps a výše uvedených 50 MSps platí pouze pro periodické signály v režimu ETS (Equivalent Time Sampling – osciloskop vykreslí jednu periodu měřeného signálu pomocí vzorků z několika skutečných period, tento režim je tedy možno použít pouze pro periodické průběhy ve velmi specifických případech).

2.4 Projekt „ScopeFun“

Tento projekt je de facto profesionální nástroj, který svojí konstrukcí připomíná běžně dostupné, komerčně vyráběné osciloskopy. Jádrem je FPGA Xilinx Artix-7, které ukládá vzorky do paměti typu DDR3 s kapacitou 512 MB. Z této paměti jsou poté vzorky odesílány pomocí mikrokontroléru EZ-USB FX3 firmy Cypress, podporující komunikační standart USB 3.1. Osciloskop má dva 10bitové převodníky AD se 250 MSps každý. Každý kanál má šířku pásma 100 MHz, 8 napětíových rozsahů, volbu vstupní vazby a vstupní SS napětíové nesymetrie.

Vazba vstupního signálu je řešena pomocí 22nF kondenzátoru, který je možno elektronicky přemostit pomocí obvodu AQY282 firmy Panasonic. Tento obvod je výrobcem nazýván jako „PhotoMOS relay“, ve skutečnosti se jedná o dva NMOS unipolární tranzistory, jejichž gate je řízen pomocí integrované LED diody. Výhodou tohoto řešení je, že není potřeba využívat drahá a rozměrná mechanická relé.

Dvě elektromechanická relé poté umožňují signál uzemnit či přivést na rezistorový dělič (využíváno pro vyšší napětíové rozsahy). O veškeré další zesílení se pak stará obvod AD8337, což je zesilovač s proměnným zesílením. Signál je následně přiveden na obvod ADA4932 (taktéž od firmy Analog Devices), což je specializovaný OZ, upravující signál pro diferenciální převodníky AD.



Obrázek 12 Analogová vstupní část jednoho kanálu projektu ScopeFun [13]

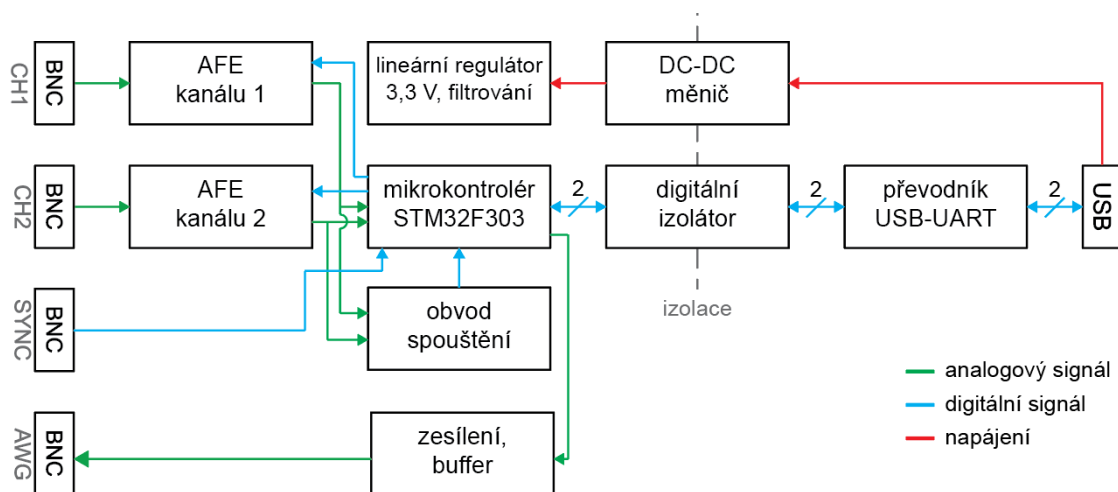
K dispozici je také dvoukanálový převodník DA s 200 MSps, který je využit jako AWG (Arbitrary Waveform Generator, generátor libovolných průběhů). Deska dále obsahuje 12kanálový logický analyzátor/generátor logických průběhů.

Jedná se tedy o velmi pokročilý projekt, pro jehož realizaci byly vybrány peníze v srpnu 2019 na platformě Crowd Supply. Cena jednoho kusu včetně hliníkového obalu byla stanovena na 750 \$ (17 500 Kč). Všechny zdrojové soubory jsou volně ke stažení pod licencí CERN-OHL na stránkách projektu. Velmi podobný je také projekt SmartScope, který využívá podobnou konfiguraci hardwaru.

3 BLOKOVÉ SCHÉMA VLASTNÍHO ŘEŠENÍ

Z předchozí kapitoly je patrné, že naprostá většina profesionálních osciloskopů využívá obvody FPGA a dedikovaný paralelní převodník AD. Některé firmy (např. Keysight) integrují převodník, spolu se vstupní analogovou částí, do jednoho vlastního čipu (tzv. ASIC – *Application-Specific Integrated Circuit*).

Řešení pomocí FPGA je ale poměrně drahé, pro splnění cíle tohoto projektu byla proto vybrána konfigurace mikrokontroléru a převodníku AD. Jelikož většina mikrokontrolérů by nebyla schopna vyčítat a ukládat data z dedikovaného převodníku AD s dostatečnou rychlostí, jako jádro celého osciloskopu byl zvolen mikrokontrolér z rodiny STM32F303 evropské firmy STMicroelectronics, jelikož má integrovanou čtveřici převodníků AD. Vždy dva spřažené převodníky AD tohoto mikrokontroléru zajišťují převod vzorků jednoho kanálu, ukládání pak zajišťuje periferie DMA. Ihned po vstupu kanálu, kterým je konektor BNC, je zařazena vstupní analogová část, zajišťující vstupní vazbu, dělení a násobení signálu. Třetí BNC slouží jako výstup generátoru libovolných průběhů.



Obrázek 13 Navržené blokové schéma osciloskopu

3.1 Mikrokontrolér STM32F303CCT6

Firma STMicroelectronics vyrábí několik řad mikrokontrolérů, z nichž právě řada F3 je určena pro tzv. Mixed-Signal Applications (tj. aplikace, zpracovávající jak digitální, tak analogový signál). Tato řada je založena na 32bitovém jádře ARM Cortex-M4, doplněném FPU (Floating Point Unit – jednotka pro výpočet tzv. „floatů“, tj. proměnných s pohyblivou desetinnou čárkou).

Důvodem pro zvolení tohoto konkrétního mikrokontroléru byly však jeho analogové

periferie. Mikrokontrolér má mimo již zmíněných čtyř převodníků AD také dva převodníky DA s rozlišením 12 bitů a vzorkovací frekvencí až 1 MSps. Též disponuje několika rychlými komparátory a operačními zesilovači s nastavitelným zesílením.

Tabulka 1 Vybrané parametry mikrokontrolérů rodiny STM32F303 [15]

Parametr	Hodnota	Jednotka
paměť Flash	32–512	kB
paměť RAM	16–80	kB
maximální pracovní frekvence	72	MHz
napájecí napětí	2–3,6	V
počet převodníků AD	4	-
počet převodníků DA	2	-
počet komparátorů	7	-
počet integrovaných OZ	4	-
počet časovačů	13	-
vyráběná pouzdra	LQFP48, LQFP64, LQFP100, WLCSP100	

3.1.1 Převodníky AD

Nejdůležitější pro tuto aplikaci je čtveřice integrovaných převodníků AD s postupnou aproximací. Každý z nich má vzorkovací frekvenci 5 MSps při rozlišení 12 bitů. Je však možno hardwarově snížit rozlišení na 10, 8 nebo 6 bitů a získat tím vyšší vzorkovací frekvenci, například při rozlišení 8 bitů je maximální vzorkovací frekvence 7,2 MSps.

Převodníky AD mohou také pracovat v diferenciálním režimu. Mikrokontrolér obsahuje multiplexer, pomocí kterého je softwarově možné zvolit vstupní kanály. Ty se dělí na dva druhy – *fast channels* (rychlé kanály) a *slow channels* (pomalé kanály). Každý převodník obvykle obsahuje 5 rychlých kanálů a 12 pomalých, ale ne všechny jsou k dispozici na vývodech mikrokontroléru, vždy záleží na pouzdře. Vzorkovacích frekvencí, uvedených výše, je možno dosáhnout pouze u rychlých kanálů.

Mikrokontrolér umožňuje sloučit dva převodníky AD dohromady (ADC1 s ADC2 a ADC3 s ADC4). Při tomto sloučení je možno nastavit několik režimů vzorkování, mimo jiné například

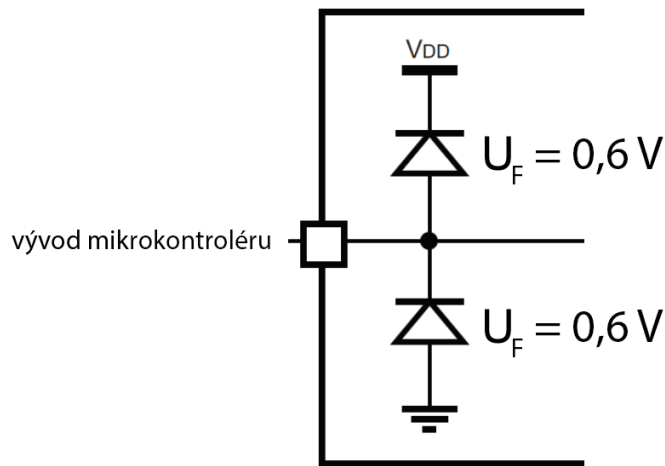
- simultánní, kdy oba převodníky zahájí konverzi ve stejnou chvíli,
- střídavý, kdy jeden převodník zahájí konverzi a druhý čeká daný časový interval před zahájením konverze.

Dvojice převodníků AD má několik společných kanálů, ale jedná se o pomalé kanály a navíc tyto kanály nejsou v menších pouzdrech (jako například LQFP48) vůbec vyvedeny.

3.2 Vstupní analogová část

Jedním ze základních požadavků tohoto projektu je bipolární vstup. Byť mikrokontrolér STM32F303 má diferenciální vstup převodníku AD, neznamená to, že by bylo možno na kterýkoliv vývod přivést záporné napětí.

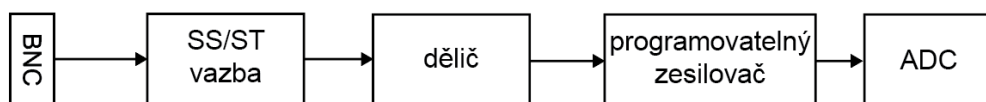
Každý vývod má totiž k sobě připojené dvě diody, viz obrázek 14. Pokud by se na vývodu objevilo napětí vyšší než napájecí napětí + 0,6 V (prahové napětí diody podle katalogového listu) či nižší než -0,6 V, začala by daná dioda vodit proud, aby zabránila poškození periferie.



Obrázek 14 Vnitřní schéma vývodu mikrokontroléru, převzato a upraveno z [15]

Toto schéma platí obecně pro naprostou většinu integrovaných obvodů. Pokud by byl zapojen zemnicí kolík BNC konektoru na skutečnou zem obvodu, bylo by nutno vytvářet záporné napájecí napětí z 5V sběrnice USB pro napájení např. OZ. I tak by stále bylo nutno signál nějakým způsobem převést ze záporné oblasti do pracovního rozsahu převodníku AD, například pomocí sčítacího OZ nebo usměrňovače.

Bylo proto zvoleno jiné řešení. Zemnicí kolík svorky BNC nebyl uzemněn, nýbrž na něj bylo přivedeno napětí rovné $\frac{1}{2}$ napájecího napětí mikrokontroléru, resp. převodníku AD (v tomto případě 1,5 V). Spolu s jednoduchým rezistorovým děličem je tak možno například signál ± 10 V převést do rozsahu 0–3 V, což je plně akceptovatelný rozsah pro převodník AD. Toto řešení má jednu podstatnou nevýhodu – je nutné, aby osciloskop či měřený obvod měly plovoucí zem vůči připojenému řídicímu PC.



Obrázek 15 Blokové schéma jednoho kanálu osciloskopu

Vstupní signál je z konektoru BNC veden na blok spínání SS/ST vazby. Tento blok se skládá z malého kondenzátoru (řádově desítky nF), který je možné elektronicky přemostit pomocí například relé. Po bloku SS/ST vazby je signál veden na frekvenčně

kompenzovaný dělič. Následuje programovatelný zesilovač, a nakonec je vzorkovaný signál přiveden na vstup převodníku AD.

3.3 Spouštění

Poté, co je signál upraven průchodem vstupní analogovou částí je rozdělen na dvě větve, z nichž jedna vede do převodníku AD a druhá na neinvertující vstup komparátoru. Na invertující vstup komparátoru je přivedeno referenční napětí, generované jedním z převodníků DA. Výstup komparátoru je přiveden na digitální vstup mikrokontroléru. Na tomto digitálním vstupu je zapnuto přerušení, a jelikož u přerušení je možné nastavit citlivost na jakoukoliv logickou změnu či pouze rostoucí/klesající průběh, lze tímto způsobem měnit spouštění na úroveň (*level*), rostoucí (*rising*) či klesající (*falling*) průběh.

Bylo by možno použít dedikovaný komparátor, ale jelikož tento mikrokontrolér má několik komparátorů integrovaných, byl využit jeden z nich. Navíc do integrovaných komparátorů je možné vnitřně přivést signál z převodníku DA, a i vnitřně přivést jejich výstup na přerušení.

3.4 Generování vzorkovacích impulsů a vzorkování

Ukládání dat z převodníku AD se může řešit pomocí přerušení – po skončení každého převodu nastaví převodník určitý bit (v tomto konkrétním mikrokontroléru bit EOC v registru SR) a tím se spustí asynchronní přerušení v kódu, ve kterém se data z převodníku uloží do paměti SRAM. Poté mikrokontrolér pokračuje v předchozí činnosti. Toto řešení je však použitelné pouze u převodů se vzorkovací frekvencí v řádech kHz.

Byť jádro tohoto mikrokontroléru dokáže fungovat na frekvenci 72 MHz, samotný přechod do přerušení trvá 12 cyklů, v průběhu kterých se uloží pracovní registry procesoru do zásobníku (stacku). Přechod je navíc delší o dalších 17 cyklů, pokud je povolena jednotka FPU. Tedy procesor je teoreticky schopen za jednu sekundu obsloužit maximálně 2,5 milionu přerušení se zapnutou jednotkou FPU. Samozřejmě takovéto číslo není ani zdaleka v praxi dosažitelné, neboť tělo přerušení by muselo minimálně obsahovat několik dalších instrukcí pro samotné ukládání dat z převodníku AD do paměti.

K vysokorychlostnímu přenosu dat z převodníku AD je proto využita periferie DMA (*Direct Memory Access*, periferie umožňující přímý přístup k paměti). Tato periferie umožňuje automaticky, tedy bez intervence jádra, přenášet data z jednoho místa v paměti do jiného. Jelikož i registr, kam převodník AD ukládá data, je pouze lokace v paměti (například registr DR převodníku ADC1 má u zvoleného mikrokontroléru adresu 0x50000040), není problém pomocí DMA automaticky ukládat data ze všech převodníků AD do paměti SRAM. Periferie DMA má i čítač, který se automaticky inkrementuje po každém přenosu a díky tomu se data z jednoho zdroje (tj. jedné adresy) budou postupně ukládat na vícero adres v paměti SRAM.

Samotný signál k zahájení konverze převodníku AD může být softwarový nebo hardwarový. Pomocí software je možno zahájit konverzi nastavením bitu v ovládacím registru převodníku AD. Hardwarově lze zahájit konverzi jedním z 16 kanálů, na které jsou přivedeny výstupy různých časovačů či například vstup digitálních vývodů skupiny

11 (PA11, PB11 apod.). Jelikož časovače mají plně nastavitelnou děličku, je možno nastavit libovolnou frekvenci vzorkování. Pomocí digitálních vstupů je zase možné synchronizovat osciloskop s externím zdrojem signálu.

3.5 Komunikační rozhraní

Mikrokontroléry rodiny STM32F303 disponují periferií USB, která umožňuje komunikaci rychlostí 12 Mb/s (standart Full-Speed verze USB 1.1). Nicméně jak už bylo zmíněno v kapitole 3.2, je celá deska osciloskopu odizolována od hostujícího počítače, bylo by proto nutné využít specializovaný obvod pro izolaci USB, například ADuM4160 od firmy Analog Devices. Takovéto obvody jsou ale poměrně drahé.

Bylo proto zvoleno jiné řešení. Samotný mikrokontrolér vysílá data po sběrnici UART, kterou je řádově snazší odizolovat díky tomu, že u USB probíhá po jednotlivých vodičích obousměrná komunikace, zatímco u sběrnice UART je komunikace na jednom vodiči jednosměrná. Tím pádem lze použít de facto jakýkoliv digitální izolátor, například ADuM1201 od stejné firmy. Pro představu, cena obvodu ADuM4160 ve vybraném obchodu je 350 Kč, zatímco cena obvodu ADuM1201 v tom stejném obchodu je pouhých 75 Kč.

Po odizolování je sběrnice UART převedena na USB pomocí dalšího integrovaného obvodu. Jako převodník USB-UART se velmi často využívají čipy firmy FTDI, například FT232. V této práci byl ale zvolen čip CH330 firmy WCH. Tento obvod v pouzdře SO-8 dokáže převádět signál sběrnice UART s rychlostí až 2,4 Mbaud na USB.

3.6 Napájení

Z důvodu snahy o izolaci desky není možné jednoduše použít +5 V ze sběrnice USB. Pro napájení osciloskopu se tedy nabízí dvě možnosti, jmenovitě

- napájení pomocí baterií (např. 3 alkalické baterie typu AA v sérii),
- napájení pomocí izolovaného DC-DC měniče.

Napájení bateriemi je technicky snazší a mnohem lepší pro citlivé analogové aplikace, nicméně nevýhodou je nutnost baterie periodicky měnit. Bylo proto zvoleno napájení pomocí střídavého izolovaného DC-DC měniče. Jeho výstup je přiveden na vstup lineárního regulátoru, který vyjma snížení napětí odstraní většinu šumu.

3.7 Generátor průběhů

Téměř všechny osciloskopy disponují kalibračním výstupem, který slouží ke kalibraci sond. Na tomto výstupu je obvykle obdélníkový signál s frekvencí 1 kHz a 50% střídou. Realizace takového výstupu je poměrně jednoduchá pomocí jednoho z integrovaných časovačů, které podporují výstup s pulzně-šířkovou modulací (PWM).

Jelikož mikrokontrolér obsahuje dva 12bitové převodníky DA, každý s vzorkovací frekvencí až 1 MSps, nabízí se jeden takovýto převodník využít pro generování průběhů. Data převodníku je možno opět načítat plně automaticky z paměti

SRAM pomocí periferie DMA. Signál pro načtení dat je navíc možno generovat pomocí časovače, je tedy možno velmi přesně nastavit frekvenci generovaného signálu.

Pomocí rozhraní UART je možno přenést data do mikrokontroléru z aplikace na hostujícím počítači, uložit je do paměti SRAM mikrokontroléru a poté je automaticky načítat do převodníku DA. Jeho výstup je zapojen na rail-to-rail OZ LMV358, který slouží jako výstupní buffer.

4 REALIZACE

V rámci práce byl nejdříve vyroben, osazen a otestován prototyp verze 0.1. Na základě získaných poznatků byla deska upravena a byl vyroben prototyp verze 0.2. Největší změnou mezi verzemi byla jiná realizace zesilovače s nastavitelným zesílením, kde ve verzi 0.1 byl použit standartní OZ a analogový přepínač, přepínající zpětnovazební rezistory. Ve verzi 0.2 byl použit OZ s digitálně nastavitelným zesílením a byla taktéž nahrazena všechna elektromagnetická relé alternativními zapojeními.

4.1 Volba součástek

Všechny součástky byly voleny v technologii povrchové montáže z důvodu snazší průmyslové montáže pájením přetavením. Pasivní součástky byly voleny velikosti 1206 (tj. 3,2 x 1,6 mm). Prototypy byly nicméně zapájeny ručním pájením.

4.1.1 Mikrokontrolér a napájení

Byl zvolen mikrokontrolér STM32F303CCT6 v pouzdře LQFP48 s 256 kB paměti Flash a 40 kB paměti RAM [15]. Z paměti RAM bylo vyčleněno 20 kB na data obou kanálů (každý kanál je tedy schopen uložit 10 tisíc snímků s rozlišením 8 bitů), 10 kB pro generátor průběhů (tj. 5 tisíc snímků s rozlišením 12 bitů) a zbytek je určen pro běh samotného firmwaru.

Analogový signál z každého kanálu je externě přiveden vždy na tři vstupy mikrokontroléru. Dva vstupy slouží jako vstup pro převodníky AD a třetí jako vstup komparátoru. U vstupů převodníků AD nebylo využito společných kanálů, jelikož se jedná o tzv. pomalé kanály, na nichž není možné dosáhnout maximální vzorkovací frekvence. V ideálním případě by každý převodník AD používal diferenciální vstup, nicméně v pouzdře LQFP48 nejsou vyvedeny diferenciální vstupy pro všechny čtyři převodníky. Používají se tedy pouze unipolární vstupy s tím, že v řídicím softwaru na PC je od každého vzorku odečteno 127 (tedy přesně polovina rozsahu, jelikož referenční napětí je vytvářeno přesně v polovině maximálního rozsahu převodníku AD).

K vytváření referenčního napětí, které tvoří virtuální zem na svorkách BNC, slouží jednoduchý rezistorový dělič 1:1, na jehož vstup je přivedeno přímo napájecí napětí převodníku AD. Výstup děliče je zesílen jedním kanálem OZ typu LMV358 firmy Texas Instruments. Na základě testování bylo zjištěno, že z důvodu stability je nutné mezi skutečnou a virtuální zem obvodu umístit 1μF kondenzátor.

Izolovaný DC-DC měnič, který slouží k napájení obvodu ze sběrnice USB, by bylo možno zkonstruovat například pomocí obvodu LT3999 firmy Linear Technology, ale komerčně jsou k dostání i již hotové moduly izolovaných DC-DC měničů. Byl zvolen modul CRE1S0505SC firmy Murata Power Solutions. Na vstupní svorky tohoto modulu je přivedeno napětí v rozmezí 4,5–5,5 V a modul udržuje na výstupních svorkách napětí cca 5 V s maximálním proudovým odběrem 200 mA.

Jelikož se jedná o spínaný měnič, bude zvlnění výstupního napětí značné a výstupní napětí bude také obsahovat velké množství šumu. Z tohoto důvodu je výstupní napětí přivedeno přes LC filtr na 3V lineární regulátor typu MCP1700 od firmy Microchip.

Tento obvod byl zvolen z důvodu vysoké přesnosti výstupního napětí, která je standardně $\pm 0,4\%$. U pouzdra LQFP48 je totiž spojený vstup pro napěťovou referenci převodníku AD s jedním z napájecích vstupů, je proto nutné, aby napájecí napětí bylo velmi přesné. Na tento kombinovaný vstup je napětí přivedeno skrz ještě druhý LC filtr tak, aby do analogové části obvodu pronikalo co nejméně digitálního šumu. Toto zapojení by mělo výrazně zredukovat šumovou složku a jakékoliv zvlnění.

4.1.2 Generátor libovolných průběhů

Jeden z převodníků DA byl využit jako generátor libovolných průběhů. Bylo vyhrazeno 10 kB paměti SRAM, což při 12 bitech na vzorek umožňuje uložit až 5 tisíc vzorků. Vzorkovací impulzy generuje 16bitový časovač TIM4, který při každém přetečení způsobí plně autonomní načtení dalšího vzorku z paměti SRAM do převodníku DA s využitím kanálu 3 periferie DMA1. Vzorkovací frekvence je plynule nastavitelná díky tomu, že jak vstupní dělička časovače, tak registr maximální hodnoty mohou obsahovat libovolné 16bitové přirozené číslo. Maximální vzorkovací frekvence je omezena parametry převodníku DA na 1 MSps, minimální je omezena parametry časovače TIM4 na 2 Hz. Firmware nedovolí zapsání hodnot mimo výše zmíněné limity.

Převodník DA má sám o sobě výstupní impedanci 15 k Ω , což je příliš mnoho pro většinu aplikací. Je možné použít vestavěný buffer, který má ale nevýhodu v omezeném rozsahu výstupních napětí, jelikož není schopen se přiblížit více jak 0,2 V k libovolné napájecí větvi. Jako řešení bylo zvoleno vyvedení signálu z převodníku DA a použití druhého kanálu rail-to-rail OZ typu LMV358. Před vstup do OZ byla vložen RC filtr typu dolní propust, který by měl zredukovat část digitálního šumu a vyhladit prudké změny výstupu. Při návrhu hodnot součástek propusti bylo potřeba vzít v potaz jednak mezní frekvenci podle rovnice 5 a také časovou konstantu τ dle rovnice 6, která udává, jak dlouho trvá změna výstupu o cca 63,2 % při skokové změně vstupu. Platí

$$f_m = \frac{1}{2\pi RC}, \quad (5)$$

$$\tau = RC. \quad (6)$$

Pokud je jako rezistor použit pouze výstupní odpor převodníku AD a z důvodu optimalizace počtu druhů součástek se použije kondenzátor s kapacitou 22 pF (stejná kapacita se využívá jako zátěž krystalu), dosazením do rovnic výše vyjde:

$$f_m = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 22 \cdot 10^{-12}} = 482 \text{ kHz}, \quad (7)$$

$$\tau = RC = 15 \cdot 10^3 \cdot 22 \cdot 10^{-12} = 330 \text{ ns}. \quad (8)$$

Výstupní napětí generátoru je omezeno na $\pm 1,5$ V vůči virtuální zemi napájecím napětím OZ, které je 3 V. Bylo by možné do obvodu přidat nábojovou pumpu (např. ve formě obvodu TC7660 od firmy Microchip), která by generovala vyšší symetrické napájecí napětí. Toto však nebylo realizováno, jelikož cílem práce je konstrukce osciloskopu, ne generátoru průběhů.

4.1.3 Operační zesilovač s nastavitelným zesílením

Ve verzi 0.1 byl zesilovač s digitálně nastavitelným zesílením zkonstruován z analogového přepínače CH444 typu DP4T, pěti rezistorů a rail-to-rail OZ MCP6072.

Analogový přepínač přepínal mezi čtyřmi různými zpětnovazebními rezistory, a tím nastavoval zesílení. Experimentálně byla ověřena funkčnost tohoto zapojení, nicméně toto zapojení nabízelo pouze 4 různá zesílení, zabíralo velkou plochu na desce a nebylo frekvenčně kompenzováno.

V druhé verzi byl proto využit OZ MCP6S91, což je zesilovač, u kterého je zesílení nastavitelné digitálně pomocí sběrnice SPI (*Serial Peripheral Interface*, sériové periferní rozhraní). Vybrané parametry jsou shrnuty v tabulce 2. Velmi důležitým aspektem při výběru OZ také bylo to, že dolní konec rezistorového děliče není interně uzemněn, nýbrž je vyveden na výstupu *VREF*. Toto dovoluje zesilovat signál vůči referenčnímu napětí 1,5 V oproti zesilování vůči zemi. Samotné zesílení je nastavitelné pomocí třívodičové sběrnice SPI jedním 16bitovým slovem.

Tabulka 2 Vybrané parametry OZ MCP6S91 [21]

Parametr	Hodnota	Jednotka
počet kanálů	1	-
nastavitelná zesílení	+1, +2, +4, +5, +8, +10, +16, +32	V/V
maximální chyba zesílení	± 1	%
vstupní napěťová nesymetrie	± 4	mV
vstupní impedance	$10^{13} \parallel 7$	$\Omega \parallel \text{pF}$
šířka pásma při $G = 1$	12	MHz
šířka pásma při $G = 32$	2	MHz
napájecí napětí	2,5–5,5	V
typická spotřeba	1,0	mA
vyráběná pouzdra	MSOP-8, SOIC-8, DIP-8	-

4.1.4 Vstupní analogová část

Hodnoty součástek vstupního děliče byly určeny následovně: kanály profesionálních osciloskopů mají většinou vstupní impedanci rovnou 1 M Ω paralelně s 10 až 16 pF [18][19]. Obojího je potřeba se držet, jelikož při použití standartní sondy 1:10 bude hodnota 1 M Ω použita jako součást děliče. Stejně tak kompenzační kondenzátor na sondě je konstruován pro kapacitu vstupu osciloskopu mezi 10–16 pF. Zároveň by osciloskop měl mít vstupní rozsah ± 20 V, tedy dělič musí v krajním případě převést hodnotu 20 V na 1,5 V. Musí tedy platit (za předpokladu, že R_1 je horní rezistor děliče), že

$$U_{ADCMAX} = U_{INMAX} \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (9)$$

Taktéž musí platit, že součet obou rezistorů je roven 1 M Ω . Po vyřešení soustavy rovnic vyjde, že $R_1 = 925$ k Ω a $R_2 = 75$ k Ω . V řadě E96 není problém najít rezistor s hodnotou 75 k Ω , nicméně nejbližší hodnota pro R_1 je 931 k Ω . Tato hodnota nicméně

představuje odchylku pouze 0,64 % od žádané hodnoty, což je v pořádku vzhledem k 1% toleranci rezistorů řady E96.

Hodnoty kondenzátorů děliče musí splňovat rovnici 10 (rovnice pro frekvenčně kompenzovaný dělič) a zároveň jejich hodnota v sérii musí být mezi 10 až 16 pF. Platí

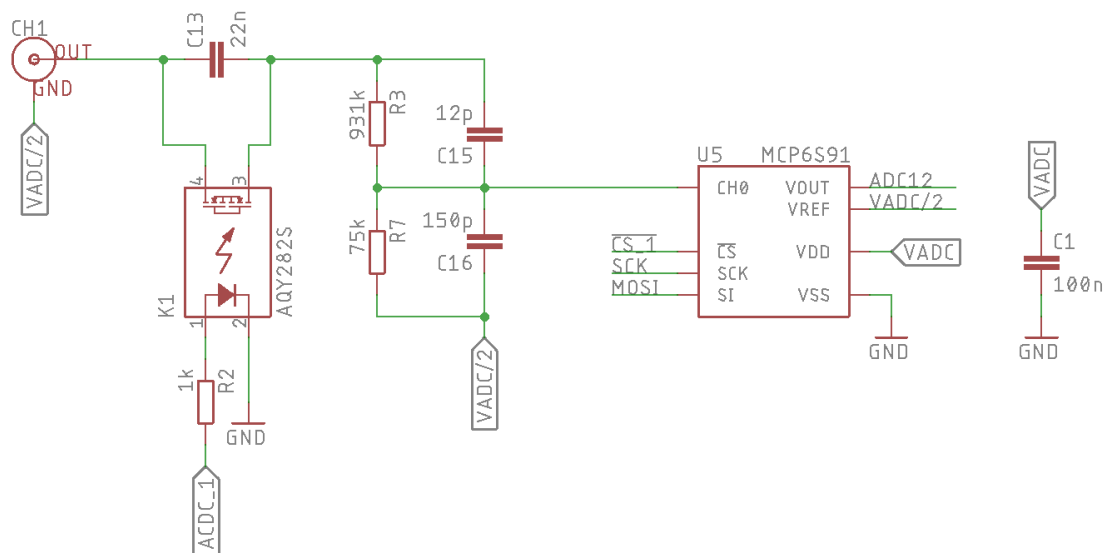
$$R_1 C_1 = R_2 C_2. \quad (10)$$

Po vyřešení pro celkovou kapacitu 16 pF vyjdou hodnoty $C_1 = 17,3$ pF a $C_2 = 214$ pF. Z důvodu použití obvyklejších hodnot kapacit bylo zvoleno $C_2 = 150$ pF a $C_1 = 12$ pF, což také splňuje podmínku pro kompenzovaný dělič velmi dobře a v sériovém zapojení bude hodnota těchto dvou kapacit rovna 11,1 pF, což je stále v požadovaném rozmezí.

Nakonec bylo potřeba určit hodnotu kondenzátoru pro střídavou vazbu. Jedná se o jednoduchou horní propust, tvořenou právě tímto kondenzátorem a rezistory děliče. Z [19] bylo zjištěno, že obvyklá mezní frekvence pro ST režim je 10 Hz, pomocí rovnice 5 tedy bylo vypočteno, že kondenzátor pro AC vazbu by měl mít hodnotu 15,8 nF. Jako nejbližší vyšší obvyklá hodnota bylo použito 22 nF, což znamená mezní frekvenci 7,2 Hz.

Pro samotné spínání kondenzátoru bylo ve verzi 0.1 využito elektromagnetické relé. Jeho velikost a hlavně spotřeba se však ukázaly jako limitující, proto bylo ve verzi 0.2 použito photoMOS relé AQY282S od firmy Panasonic Industrial Devices [20]. Jedná se o unipolární tranzistor typu MOSFET, na jehož terminál gate je připojený fotoelektrický prvek, který je osvětlován integrovanou LED diodou. Vstup je díky tomu plně galvanicky oddělený od výstupu a samotný MOSFET tak může spínat plovoucí signály.

Výsledná vstupní analogová část verze 0.2 tak vypadala dle obr. 16, kde $V_{ADC}/2$ je referenční napětí rovné jedné polovině napájecího napětí převodníku AD V_{ADC} .



Obrázek 16 Schéma jednoho kanálu vstupní analogové části

Dostupné rozsahy s takto zvoleným děličem a PGA zesilovačem jsou shrnuty v tabulce 3:

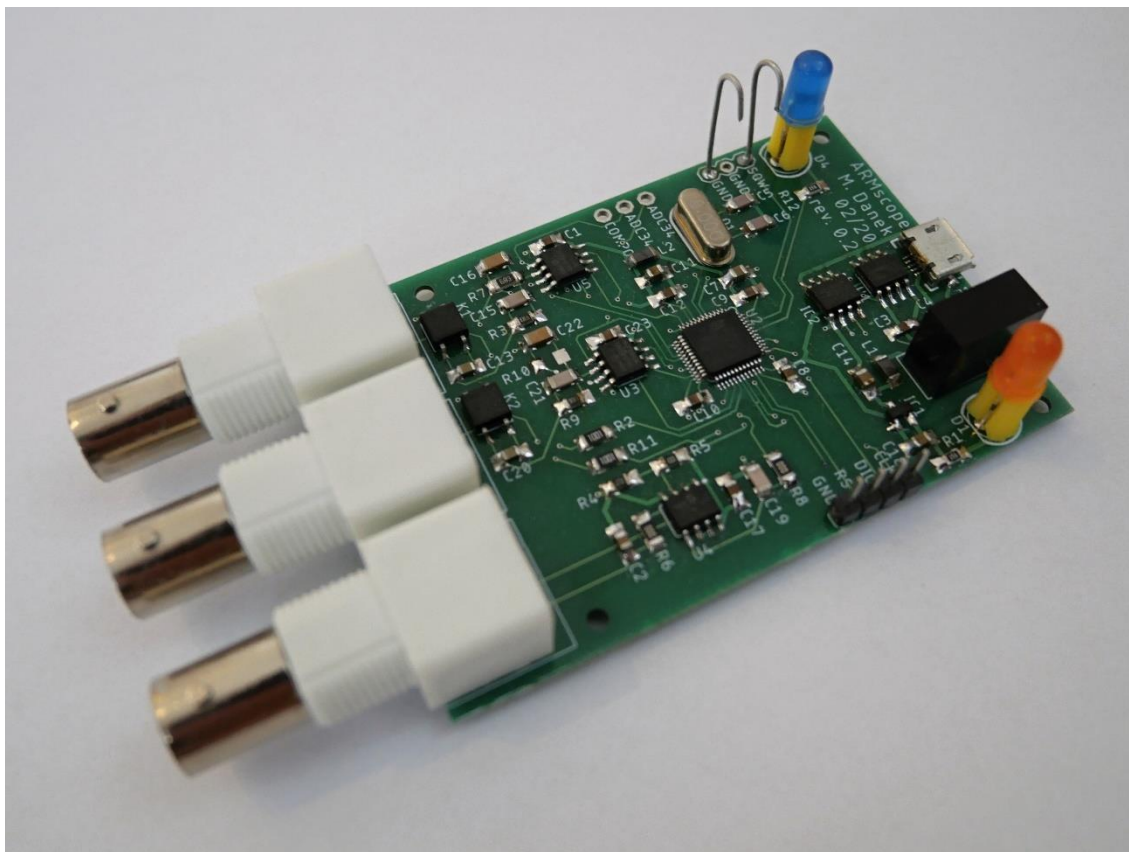
Tabulka 3 Vstupní rozsahy při různých zesíleních PGA

Zesílení PGA [-]	Max. vstupní napětí [V]
1	20,12
2	10,06
4	5,03
5	4,02
8	2,52
10	2,012
16	1,26
32	0,63

Byla taktéž zvážena možnost implementace spínatelné 50Ω vstupní terminace pomocí rezistoru a výše zmíněného photoMOS relé, od tohoto bylo však upuštěno primárně z důvodu, že 50Ω terminace se používá hlavně u vysokofrekvenčních signálů s nízkou amplitudou, což nejsou signály, které by bylo vhodné měřit tímto osciloskopem.

4.2 Výroba DPS

Pro celý prototyp byla navržena deska v programu Eagle 9.3.0. V tomto softwaru byla poté vytvořena i výrobní data, na základě kterých byla deska vyrobena profesionální firmou. Rozměry desky verze 0.2 jsou 50×75 mm (bez osazených BNC konektorů, které desku přesahují). Tloušťka desky byla zvolena 1 mm.



Obrázek 17 Osazená deska zařízení

Pro celé zařízení byla v programu SolidWorks 2017 vytvořena dvoudílná krabička, která byla následně vytištěna na 3D tiskárně z materiálu PLA (*Poly Lactic Acid*, polymléčná kyselina). Stejně tak byly vytištěny podpurné sloupky pro obě stavové LED diody. Na plastovou samolepící fólii byly vytištěny popisky (např. názvy kanálů) a nalepeny na krabičku. Nakonec byla celá krabička zevnějšku ošetřena bezbarvým akrylovým lakem, který částečně zakryje nerovnosti 3D tisku a sjednotí lesk materiálu, čímž skryje místa s průhlednou plastovou fólií s popisky. Pro spojení obou polovin krabičky a desky byly využity šrouby M2x16 se zápusťnou hlavou a mosazné závitové vložky, které byly pomocí pájky zapuštěny do materiálu. Zespodu byly na krabičku nalepeny gumové nožičky, aby se předešlo pohybu osciloskopu po pracovním stole.

Výsledné rozměry zařízení včetně BNC konektorů jsou 57 x 100 x 20 mm (šířka x délka x tloušťka) a váha 65 g.

4.3 Firmware pro mikrokontrolér

Samotný firmware byl napsán v jazyce C++ v prostředí Keil μ Vision v5.22. Ke kompilaci byl využit kompilátor MDK-ARM Professional V5.22. Firmware zabírá 7,8 z 256 kB paměti Flash a 31,6 z 40 kB paměti RAM.

4.3.1 Řízení převodu AD

Původním úmyslem bylo využít spřažený režim převodníků, kdy časovač generuje vzorkovací impulzy pro hlavní (*master*) převodník AD a ten generuje vzorkovací impulzy pro řízený (*slave*) převodník. Samotný spřažený režim podporuje několik různých módů, např. *alternate trigger mode* (režim se střídavým vzorkováním) či *interleaved trigger mode* (režim s odloženým vzorkováním).

Jako ideální se jevílo využití režimu se střídavým vzorkováním, kdy první vzorkovací pulz spustí vzorkování na prvním převodníku, druhý pulz na druhém převodníku, třetí opět na prvním atd. Tento režim má však tu nevýhodu, že je možné jej použít pouze na tzv. nepravidelné (*injected*) kanály, které ale zase nepodporují ukládání dat pomocí DMA.

Následně byl vyzkoušen režim s odloženým vzorkováním, kdy vzorkovací impulz spustí vzorkování na prvním převodníku a vzorkování na druhém převodníku se automaticky spouští po uplynutí konfigurovatelné pauzy. Nevýhodou toho režimu je ale malý rozsah konfigurovatelné pauzy, kterou je možno nastavit na maximálně $8 \cdot t_{ADC}$, kde t_{ADC} je doba konverze jednoho vzorku. Prakticky by toto znamenalo, že u některých vzorkovacích frekvencí by bylo nutno vypínat a u některých zase zapínat druhý z převodníků AD, což by působilo značné komplikace při dalších činnostech (např. odesílání dat apod.). Navíc v některých verzích mikrokontroléru STM32F303 je na samotném čipu chyba přiznaná výrobcem [22], která v tomto režimu způsobuje selhání DMA.

Nakonec bylo použito řešení, které naprosto obchází spřažený režim. Bylo využito faktu, že u hardwarového spouštění každého převodníku AD se dá individuálně nastavit citlivost na vzestupnou nebo sestupnou hranu. Vždy jeden z dvojice převodníků ADC1/2 a ADC3/4 je tak nastaven na vzestupnou a druhý na sestupnou hranu vzorkovacího signálu.

Pro generování vzorkovacího signálu byl využit čítač 2 a jeho dvě porovnávací jednotky CC2 a CC3 (*Capture/Compare* – zachycení/porovnání). Čítač počítá od nuly až do čísla, nastaveného v registru ARR (*Auto Reload Register*), poté se vyresetuje na 0 a celý cyklus se opakuje. Jednotky CC mají v sobě nastavenou polovinu hodnoty registru ARR a pracují v režimu PWM (*Pulse Width Modulation* – pulzně-šířková modulace). Tedy pokud je hodnota čítače nižší než hodnota registru CC, je výstup logická 1, pokud je hodnota nižší, je výstup logická 0. Tento signál je pak přiveden na převodníky AD podle tabulky 4:

Tabulka 4 Nastavení převodníků AD

Převodník	Zdroj vzorkovacího signálu	Vzorkovací hrana	Kanál osciloskopu
ADC1	TIM2 CC2	vzestupná	CH1
ADC2		sestupná	
ADC3	TIM2 CC3	vzestupná	CH2
ADC4		sestupná	

Vzorkovací signály mají díky výše zmíněnému nastavení vždy 50% střidu. Díky tomuto se převodníky de facto chovají jako v režimu se střídavým vzorkováním. Značnou výhodou tohoto řešení je možnost zastavit či zapnout vzorkování všech převodníků najednou jedinou instrukcí, která zapne/vypne časovač 2.

Nevýhodou tohoto řešení je nutnost používat jeden DMA kanál pro každý převodník, tedy do paměti SRAM zapisují 4 kanály najednou. Tento mikrokontrolér obsahuje pouze dva řadiče DMA, z čehož převodník ADC1 je přiřazen řadiči DMA1 a zbylé převodníky jsou přiřazené řadiči DMA2. Při maximální vzorkovací frekvenci 14,4 MSps tak občas docházelo k saturaci řadiče DMA2. Jediným řešením bylo omezit maximální vzorkovací frekvenci na 11 MSps. Z důvodu usnadnění výpočtů v aplikaci pak bylo použito pouze 10 MSps, aby na jeden dílek zobrazeného průběhu vycházelo přesně 10 μ s.

4.3.2 Spouštění

Ke spouštění se využívá integrovaný komparátor mikrokontroléru, na jehož invertující vstup je vnitřně přiveden výstup jednoho z převodníků DA. Na neinvertující vstup je externě přiveden stejný signál jako na převodník AD. Přepínání kanálu je realizováno tak, že mikrokontrolér umožňuje zvolit jako neinvertující vstup buďto vývod PA3 nebo PA7. Na první z těchto vývodů je tak přiveden první kanál a analogicky na druhý z těchto vstupů je přiveden druhý kanál. Softwarově je pak mezi nimi možno přepínat.

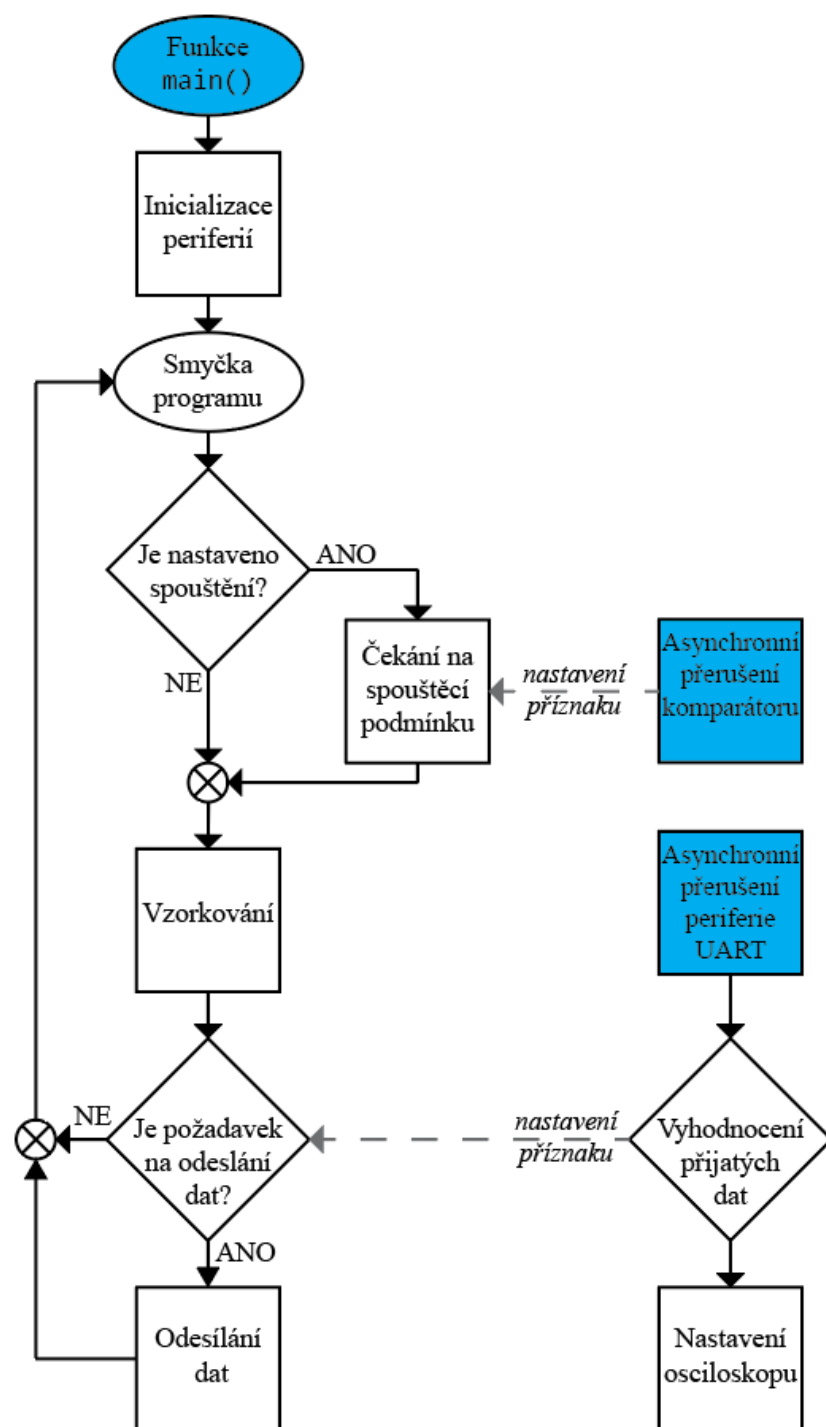
Na výstup komparátoru je připojené přerušení, které má nastavitelnou polaritu – lze takto realizovat spouštění na vzestupnou (*rising*) nebo sestupnou (*falling*) hranu či na úroveň (*level/any*). V samotném přerušení se pouze nastaví proměnná, indikující spouštění. Nevýhodou tohoto řešení je, že přechod a výstup z přerušení trvá 56 instrukcí [17], což způsobuje prodloužení před spuštěním vzorkování. Jelikož je ale prodloužení konstantní, systém spouštění plní svoji funkci a stabilizuje na obrazovce průběh signálu.

Rychlejší řešení by bylo pomocí tzv. *pollingu*, kdy by se software ve smyčce dotazoval na nastavení příznaku přerušení, ale samotné provedení přerušení by bylo vypnuto přes periferii NVIC (*Nested Vector Interrupt Control*, prioritní kontrolér přerušení). Toto se však nepodařilo zrealizovat, jelikož jádro je pravděpodobně koncipováno tak, že vyžaduje provedení funkce přerušení v případě nastavení příznaku.

4.3.3 Generátor libovolných průběhů

Generátor průběhů má vyhrazených 10 kB v paměti RAM, ze kterých jsou data automaticky načítána. Bylo zvoleno řešení, kdy řídicí aplikace do osciloskopu pouze pošle požadované parametry signálu (napětí špička-špička, frekvence, typ průběhu) a samotný osciloskop si dopočítá hodnoty jednotlivých vzorků. Toto řešení je méně náročné na komunikaci po sběrnici UART, nevýhodou je ale omezený počet různých průběhů/funkcí, které je osciloskop schopen generovat.

Ke generování také nemusí být využito všech 5000 vzorků – maximální vzorkovací frekvence převodníku DA je pouze 1 MHz, při použití 5000 vzorků na jednu periodu by tedy maximální výstupní frekvence byla pouze 200 Hz. Počet vzorků na jednu periodu je možno nastavit ve firmwaru mikrokontroléru.



Obrázek 18 Diagram programu mikrokontroléru

Celý firmware běží v nekonečné smyčce pro vzorkování viz obrázek 18. Všechny ostatní činnosti osciloskopu probíhají asynchronně, tj. s využitím přerušení (např. příjem dat z řídicí aplikace) či pomocí DMA (samotné ukládání vzorků či jejich načítání do převodníku DA pro generátor libovolných průběhů).

4.3.4 Komunikace s řídícím PC

Data z počítače do osciloskopu jsou přenášena pomocí 2B paketů. Periferie DMA ukládá přijatá data do jednoduchého bufferu a firmware osciloskopu má pak zapnuté přerušení při obdržení celého paketu. Vždy první byte udává příkaz (např. *0x10* – požadavek na odeslání vzorků, *0x40* – nastavit úroveň spouštění) a druhý byte slouží jako parametry daného příkazu (např. požadovaná úroveň spouštění).

Samotné tělo přerušení pak obsahuje jednoduchou rozhodovací strukturu, která přímo volá funkce pro nastavení daného parametru. Architektura ARM umožňuje volání funkcí z těla přerušení a dané funkce jsou jednoduché (tím pádem rychlé na provedení). Neplatné příkazy se zahazují.

Data z osciloskopu do počítače jsou přenášena přímo, tj. software uloží jeden vzorek do příslušného registru, čeká na jeho odeslání, ukládá další atd. Samozřejmě by i zde bylo možné použít periférii DMA, v tomto scénáři by však nepředstavovala podstatné zrychlení. Použitý mikrokontrolér i převodník USB-UART podporují rychlosti až 2,4 MBaud, ale při těchto rychlostech docházelo k častým chybám, pravděpodobně díky prodlení použitého izolátoru a faktu, že UART je asynchronní protokol, tedy velmi náchylný na odchylky v časování.

5 OVLÁDACÍ SOFTWARE

Jeden z nejdůležitějších aspektů jakéhokoliv (i laboratorního) zařízení je uživatelské rozhraní. Ovládání musí být co nejsnazší, nejrychlejší a nejintuitivnější a data prezentovaná zařízením musí být jasná a zřetelná. U USB osciloskopu je tímto rozhraním aplikace na řídicím počítači (dále pouze jako *aplikace*).

Aplikaci je možno rozdělit do tří funkčních celků, a to sice

- komunikačního, který bude mít za úkol přijímat a ukládat data ze sériového portu,
- grafického, který bude mít za úkol vykreslovat samotné průběhy z osciloskopu, osy grafu, jejich popisky apod.,
- ovládacího, který umožní uživateli měnit parametry osciloskopu, např. vstupní napěťový rozsah kanálů, rychlost vzorkování atd.

Má-li osciloskop vykreslit průběh napětí 5x za vteřinu, znamená to za jednu vteřinu přijmout a uložit $5 * 2 * 10\,000 = 100\,000$ vzorků a tyto vzorky také vykreslit do grafu včetně přepočtu ze surového měření převodníku AD na skutečné napětí. I přes dnešní gigahertzové procesory je tedy nutné, aby aplikace byla co nejvíce efektivní, co se výpočtů a vykreslování týče.

Prvotní experimenty byly uskutečněny v jazyce C# s využitím Windows Forms, ukázalo se ale, že tato platforma nedokáže dostatečně rychle a bezchybně přijímat velké množství dat ze sériového portu.

5.1 Aplikace verze 0.1

První skutečná verze aplikace byla vytvořena v jazyce Processing ve stejnojmenném prostředí. Velkou výhodou tohoto jazyka je relativně přímý přístup k sériovému portu a také možnost rozsáhlého nastavení vykreslování, např. nastavení obnovovací frekvence okna či možnost přímo zakreslovat body do jeho plochy. Prostředí Processing je navíc multiplatformní, tj. výslednou aplikaci by bylo teoreticky možno vyexportovat nejenom pro zařízení s operačním systémem Windows, ale i pro operační systémy Linux, Mac OS či dokonce Android.

V průběhu vývoje se však ukázalo, že i toto prostředí je slepá cesta. Prvním důvodem byla jednak obrovská neefektivita jazyka, který je sám o sobě založen na jazyce Java, který běží ve virtuálním prostředí (tzv. *Java Virtual Machine, JVM*), tedy veškeré instrukce se musí virtualizovat, což je velmi neefektivní proces [23]. Druhým důvodem bylo velmi komplikované vykreslování jakýchkoliv prvků GUI (*Graphical User Interface*, grafické rozhraní aplikace).

5.2 Aplikace verze 0.2

Výsledná aplikace byla vytvořena v jazyce C# v prostředí .NET Framework 4.7.2 s využitím výše zmíněných Windows Forms. Pro vývoj bylo využito prostředí Visual Studio 2019.

Oproti prvotním pokusům však bylo využito vícevláknové zpracování. První procesorové vlákno se stará o příjem informací ze sériového portu, a jakmile přijme celý set dat (tj. data z obou kanálů), vyrozumí o tom druhé vlákno a též požádá osciloskop o poslání dalšího setu. Druhé vlákno mezitím vymaže stará data z grafu, přepočítá vzorky z převodníku AD na hodnoty skutečného napětí na základě rovnice 11 a nakonec je do grafu vykreslí. Poslední vlákno má na starost obsluhu uživatelského rozhraní, kdy reaguje např. na změnu v roletě možných zesílení a případné změny udělané uživatelem pomocí sériového portu zasílá do osciloskopu. Pak

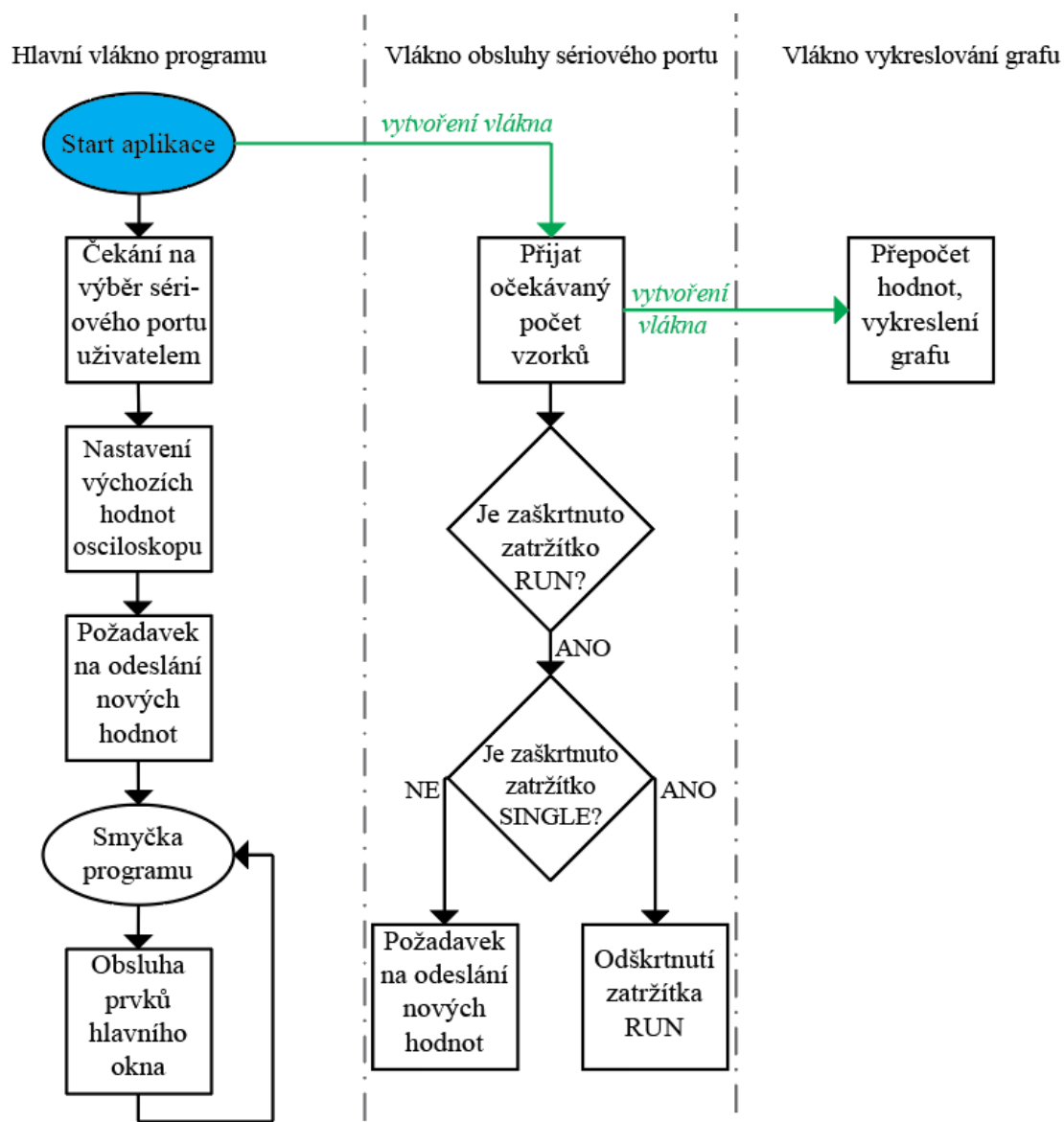
$$U = (n - 127) * A_{UZ1} * k_{ADC}. \quad (11)$$

Proměnná n značí přijatý vzorek (přirozené číslo od 0 do 255) a A_{UZ1} značí celkové napěťové zesílení/zeslabení při nastavení vstupního OZ na zesílení 1. Celkové napěťové zesílení/zeslabení je součin zeslabení vstupního rezistorového děliče a zesílení vstupního OZ. Proměnná k_{ADC} je konstanta udávající hodnotu napětí, která koresponduje 1 LSB (*Least Significant Bit*, bit s nejnižší hodnotou) a je možno ji vypočítat podle rovnice 12, kde U_{REF} je referenční/napájecí napětí převodníku AD a b je počet bitů (rozlišení) tohoto převodníku

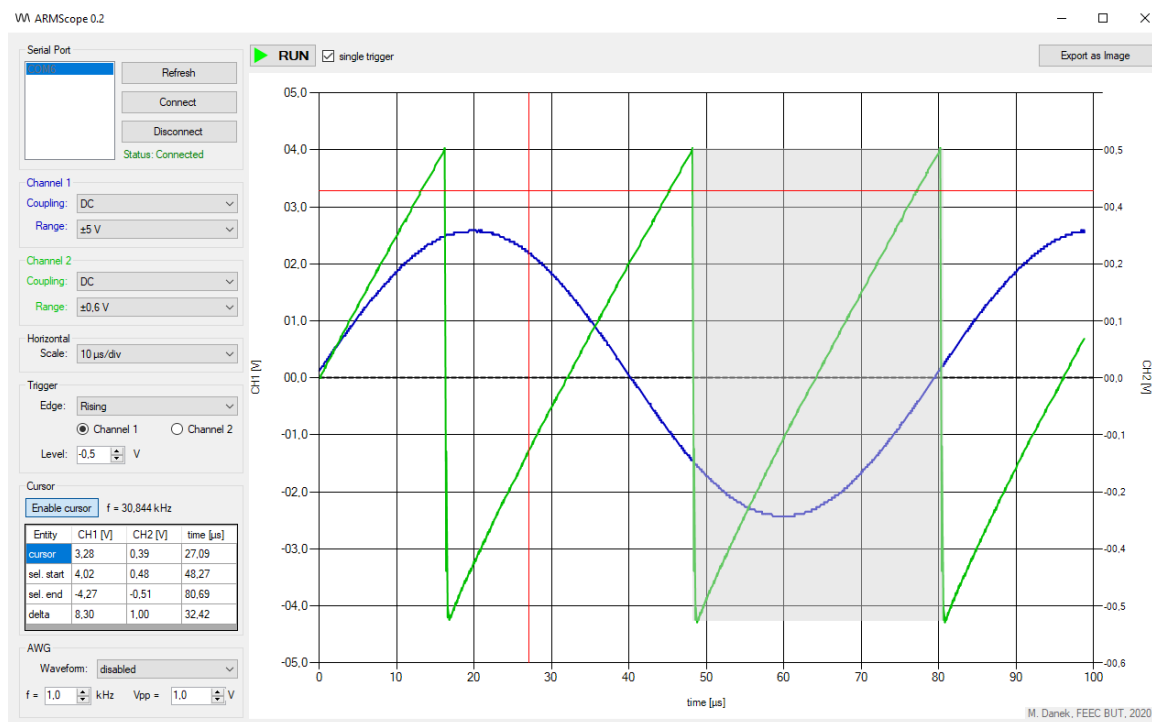
$$k_{ADC} = \frac{U_{REF}}{b}. \quad (12)$$

Při nastavení sériového portu na modulační rychlost (*baud*) 921600 je aplikace schopna obnovit graf přibližně 5–6x za vteřinu. Tato obnovovací frekvence je omezena rychlostí sériového portu spíše než rychlostí vykreslování. Na čtyřjádrovém procesoru Intel Core i7-6700HQ s frekvencí 2,6 GHz představuje aplikace cca 35% zátěž.

Z důvodu úspory výpočetního výkonu také aplikace standartně nevykresluje všech 10 000 vzorků každého kanálu, jelikož na šířku běžného Full HD (1920 x 1080 px) monitoru ani tolik bodů nelze zapsat. Standartně se tedy vykresluje pouze každý desátý bod a až při nastavení menšího měřeného úseku na např. 10 μ s/div se vykreslí všechny body.



Obrázek 19 Vývojový diagram programu pro řídicí PC



Obrázek 20 Ukázka PC aplikace včetně kurzoru a výběru oblasti

5.3 Funkce

Na obrázku 20 je vidět uživatelské rozhraní aplikace. Výsledný soubor .exe má velikost 133 kB a je možné jej spustit jak na architektuře x86, tak i x64. Knihovny k jeho běhu jsou standardně součástí Windows.

5.3.1 Připojení osciloskopu

Po spuštění uživatel tlačítkem *Refresh* (obnovit) obnoví seznam dostupných sériových portů, vybere z nich ten, ke kterému je připojen osciloskop a klikne na *Connect* (připojit). Aplikace vyresetuje osciloskop pomocí předdefinovaného příkazu a nastaví jej na výchozí hodnoty. V případě úspěšného spojení se v textovém poli pod tlačítky zeleně zobrazí *Status: connected* (Stav: připojeno). V případě neúspěchu se zobrazí chybová hláška. Uživatel může pomocí tlačítka *Disconnect* (odpojit) odpojit aplikaci od sériového portu a uvolnit jej tak.

Jelikož osciloskop používá jako převodník UART-USB obvod CH330, je potřeba nejdříve nainstalovat příslušný řadič [24].

5.3.2 Nastavení osciloskopu

Uživatel může kdykoliv po připojení osciloskopu pomocí rolet v levé části okna nastavit vertikální citlivost jednotlivých kanálů či horizontální rozlišení na jeden dílek grafu. Aplikace okamžitě reaguje na změnu a posílá do osciloskopu příkaz ke změně daného nastavení, není tedy třeba nikde nic potvrzovat.

Dále je možné vybrat režim spouštění. Výchozí hodnota je *None (trigger disabled)* (žádný – spouštění vypnuto), kdy osciloskop nečeká na signál spouštění a po odeslání celého vzorku dat začne ihned znovu snímat. Je také možno vybrat *Rising* (vzestupná hrana), *Falling* (sestupná hrana), nebo *Any* (jakákoliv hrana).

Úroveň, na kterou obvod spouštění reaguje, je možno zapsat přímo do číselníku level (úroveň) přímo či ji nastavit pomocí šipek. Číselník nedovolí zapsání neplatné hodnoty (tj. hodnoty větší, než je aktuální rozsah). Software přepočte zde zadanou hodnotu na rozsah 0–200, kde 0 odpovídá dolní hranici vstupního rozsahu aktuálně vybraného kanálu a 200 hranici horní. Toto číslo je následně odesláno pomocí sériového portu. Kanál, na který obvod spouštění reaguje, se nastavuje dvojicí přepínacích tlačítek.

Pomocí přepínače *RUN* (zapnout) je možné zapnout či vypnout obnovování grafu. Toto je užitečné, pokud si například uživatel potřebuje prohlédnout zobrazené průběhy apod. Pokud je zaškrťovací políčko *single trigger* (jediný vzorek) zaškrtnuto, po zobrazení jednoho průběhu osciloskop automaticky vypne režim *RUN*.

Pomocí tlačítka *Export as Image* je možno vyexportovat aktuálně zobrazený průběh, včetně os, kurzorů a vybrané oblasti, do souboru PNG.

5.3.3 Kurzory

Z důvodu úspory výpočetního výkonu je nutno vykreslování kurzorů nejprve zapnout, a to sice pomocí tlačítka *Enable* (zapnout) v oblasti *Cursor* (kurzor). Pokud uživatel následně najede myši do prostoru grafu, zobrazí se dvě červené linie, symbolizující kurzor. Zároveň se při každém pohybu myši aktualizuje aktuální hodnota napětí a času kurzoru vůči oběma kanálům v tabulce.

Stisknutím levého tlačítka myši a tažením je možné v grafu vybrat určitou oblast. V tabulce se zobrazí hodnoty napětí kanálů a času pro počátek a konec oblasti a také rozdíl těchto hodnot. Dále se zobrazí frekvence vybrané oblasti, což je užitečné pro rychlé změření frekvence signálu. Frekvence se počítá jako převrácená hodnota rozdílu času vybrané oblasti.

5.3.4 Generátor průběhů

Posledním nastavitelným prvkem je generátor průběhů. Ten je ve výchozím stavu vypnutý, ale pomocí rolety je možno nastavit průběh výstupního signálu, jeho amplitudu a frekvenci. Samotné generování hodnot vzorků se provede až v mikrokontroléru, který vypočítá jednotlivé vzorky na základě požadovaného průběhu a amplitudy a nastaví frekvenci časovače na základě požadované frekvence.

6 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI

Nejdůležitějším parametrem jak osciloskopu, tak i generátoru, který je nutno ověřit, je šířka pásma. Šířka pásma je definována jako rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší frekvencí signálu, kdy nedojde k poklesu o více jak 3 dB (cca 70 %). Hodnota zesílení v decibelech byla vypočtena dle rovnice 13, kde za hodnotu U_{OUT} je dosazována aktuální hodnota napětí při dané frekvenci a za hodnotu U_{IN} je dosazována hodnota při frekvenci 1 kHz. Platí

$$A_U = 20 \log \left(\frac{U_{OUT}}{U_{IN}} \right) [dB]. \quad (13)$$

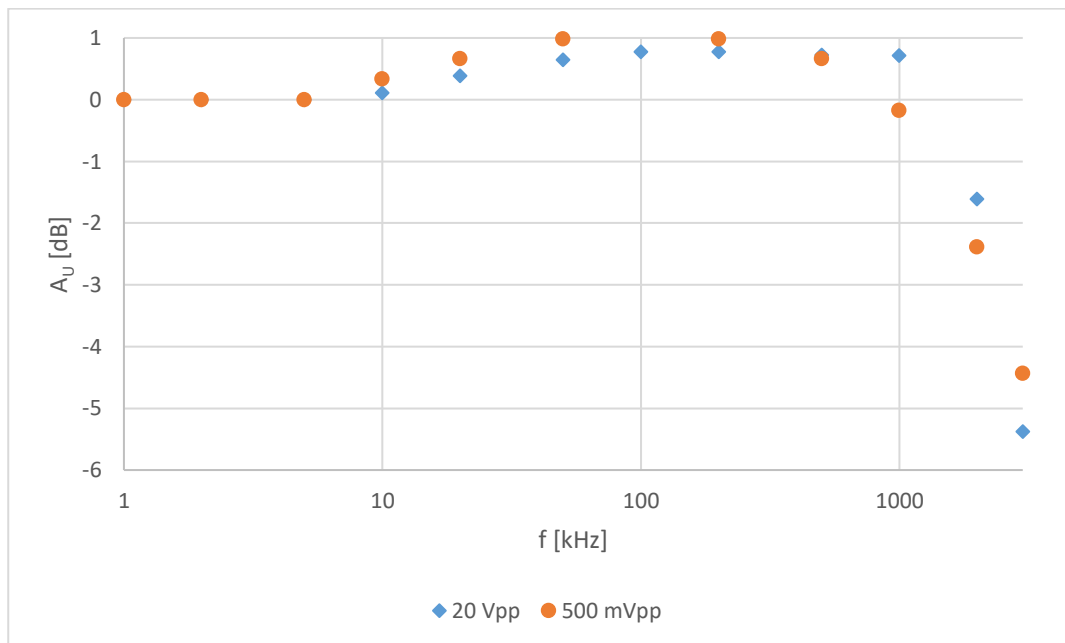


Obrázek 21 Finální podoba zařízení

6.1 Osciloskop

Výstup z laboratorního generátoru funkcí FY6800 byl přiveden propojovacím BNC kabelem na kanál 1 zkonstruovaného osciloskopu. Postupně byla zvyšována frekvence v řadě 1, 2, 5, 10, ... kHz. Zobrazený průběh byl vždy pozastaven a pomocí kurzorů bylo vyčteno napětí špička-špička a zaneseno do tabulky. Tento experiment byl proveden dvakrát, jednou byl vstupní signál sinus s napětím špička-špička 20 V a podruhé 500 mV.

Výsledky měření byly vyneseny do grafu na obrázku 22:

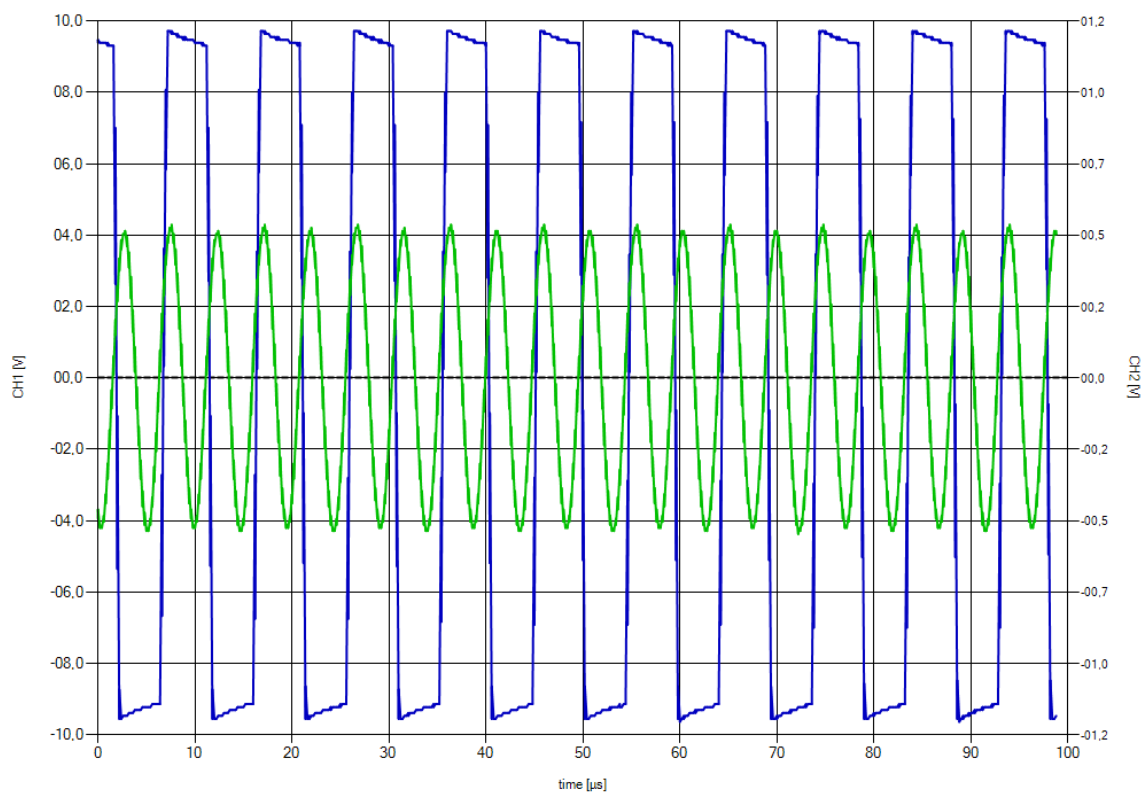


Obrázek 22 Graf zesílení při různých frekvencích a amplitudách signálu

Z grafu je možno vyčíst, že šířka pásma osciloskopu je přibližně 2300 kHz a příliš nezáleží na konkrétním zesílení. Je však nutno podotknout, že při frekvenci 2300 kHz už na jednu periodu signálu připadají pouze čtyři vzorky, což sice splňuje Shannon-Nyquistovu podmínku, ale praktická použitelnost takto zobrazeného signálu je minimální.

V grafu je vidět růst zesílení mezi frekvencemi 10 kHz až 1 MHz, který je pravděpodobně způsoben kombinací frekvenčně překompenzovaného vstupního děliče (viz dále) a metody měření, která bere jako referenční napětí hodnotu při 1 kHz.

Pro ilustraci byl z aplikace vyexportován průběh obdélníkového a sinusového signálu s frekvencí 100, resp. 200 kHz, na obrázku 22.

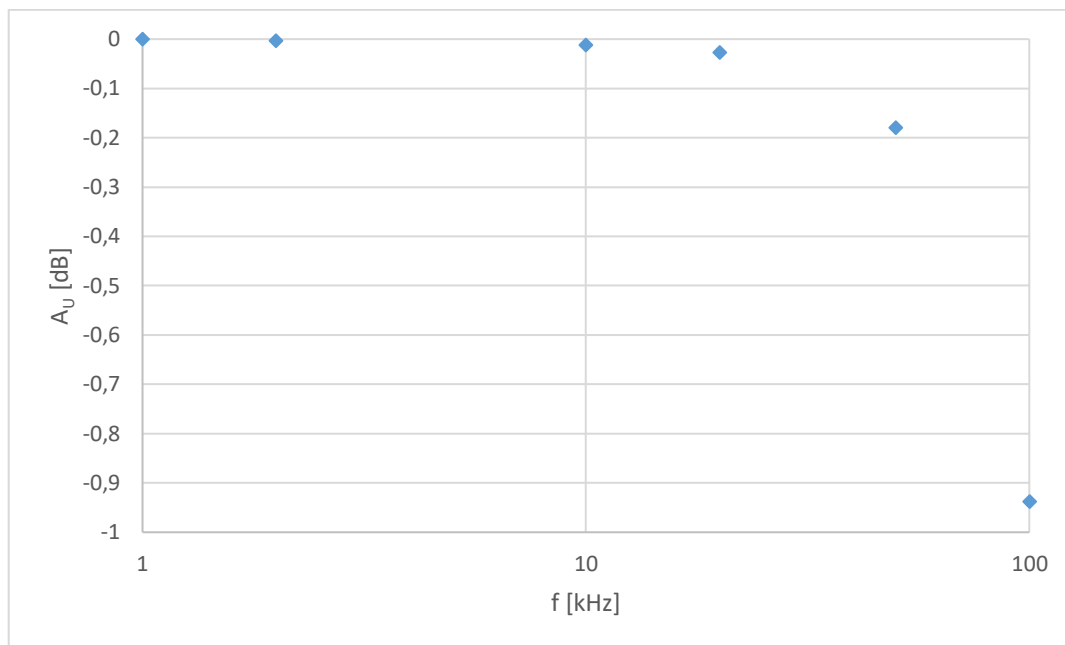


Obrázek 23 Vyexportovaný průběh obdélníkové a sinusového signálu s frekvencí 100, resp. 200 kHz

Je patrné, že u kanálu 1 se projevuje kapacitní složka frekvenčně kompenzovaného vstupního děliče. Jelikož se tento jev u kanálu 2 neprojevuje (i při stejném vstupním signálu), patrně je problém ve vysoké toleranci vstupních keramických kondenzátorů (která je běžně $\pm 5\%$). Nejlepší řešení by pravděpodobně bylo použít kombinaci kondenzátoru a kapacitního trimru (stejně jako např. na sondách), pomocí kterého by se přesně nastavila hodnota kompenzace.

6.2 Generátor průběhů

Na generátoru byl nastaven sinusový výstup s napětím špička-špička 1 V a signál byl pomocí propojovacího BNC kabelu přiveden na vstup USB osciloskopu PicoScope 2406B. Pomocí aplikace byla zvyšována frekvence generátoru podle stejné řady jako u osciloskopu. Do tabulky byly zapsány hodnoty amplitudy na výstupu (změřené pomocí automatické funkce osciloskopu PicoScope), pomocí rovnice 13 převedeny na hodnotu v decibelech a vyneseny do grafu na obrázku 24.



Obrázek 24 Graf zesílení výstupu generátoru vůči frekvenci

Z grafu je patrné, že i při frekvenci signálu 100 kHz nedojde k poklesu výstupu o 3 dB a více. Frekvence 100 kHz je uměle stanovená hranice – aplikace nedovolí zadat vyšší hodnotu. Je to z důvodu, že při frekvenci výstupního signálu 100 kHz a frekvenci převodníku DA 1 MHz připadá na jednu periodu signálu 10 vzorků, což je už samo o sobě poměrně málo a nemá cenu zadávat vyšší frekvence.

Průběh zesílení byl nicméně proložen přímkou a extrapolací bylo dospěno k závěru, že šířka pásma generátoru je cca 340 kHz.

6.3 Dosažené parametry zařízení

Tabulka 5 shrnuje dosažené parametry zkonstruovaného zařízení.

Tabulka 5 Shrnutí dosažených parametrů osciloskopu

Parametr	Hodnota	Jednotka	Poznámka
<i>Parametry osciloskopu</i>			
počet vstupních kanálů	2	-	
vstupní rozsahy	± 20 ; ± 10 ; ± 5 ; ± 4 ; $\pm 2,5$; ± 2 ; ± 1 ; $\pm 0,6$	V _{P-P}	
šířka pásma osciloskopu	2300	kHz	
počet vzorků na kanál	10000	-	

vzorkovací frekvence na kanál	10	MHz	
vertikální rozlišení	8	bitů	
<i>Parametry generátoru průběhů</i>			
šířka pásma generátoru průběhů	340	kHz	
počet vzorků	5000	-	rozlišení vzorku = 12 bitů
max. vzorkovací frekvence	1	MHz	
max. frekvence výstupního signálu	$10^6 / n$	Hz	n = počet vzorků na jednu periodu generovaného signálu
max. amplituda signálu	3	V _{PP}	
<i>Obecné parametry zařízení</i>			
proudový odběr z USB	85	mA	
rozměry	57 x 100 x 20	mm	šířka x délka x tloušťka
hmotnost	65	g	
odhadovaná cena	350	Kč	Cena komponent, desky a krabičky, neobsahuje montáž.

7 ZÁVĚR

Cílem práce bylo zkonstruovat jednoduchý a levný USB osciloskop pro začátečníky či studenty středních škol, kteří běžně nepracují s kmitočty vyššími jak 100 kHz (např. na programovatelných deskách typu Arduino či při jednoduchých analogových pokusech). Jako řešení bylo zvoleno použití mikrokontroléru řady STM32F303 s velmi rychlými integrovanými převodníky AD. V prvním prototypu byla ověřena základní funkčnost jednotlivých bloků, v druhém (finálním) prototypu byla provedena hlavně vylepšení vstupní analogové části.

Šířka pásma osciloskopu byla stanovena na 2,3 MHz (veškeré technické parametry viz tabulka 5), což je dostatečné pro základní práci s programovatelnými deskami stylu Arduino či různé začátečnické experimenty. Stejně tak všechny ostatní dosažené parametry osciloskopu odpovídají plně funkčnímu a prakticky použitelnému zařízení. Cíl práce je tedy považován za splněný.

Z důvodu saturace periferie DMA nebyl využit plný potenciál převodníků, jelikož kvůli spolehlivosti musela být omezena vzorkovací frekvence na 10 MHz na kanál.

Součástí práce byl také vývoj řídicí aplikace pro PC. Po několika experimentech byla aplikace vytvořena v jazyce C# na platformě .NET. Aplikace plně funguje a obsahuje všechny důležité funkce osciloskopu, od kurzorů po export zobrazeného průběhu. Jedinou nevýhodou je vyšší zátěž na procesor z důvodu častého překreslování.

Na osciloskopu by bylo možno značně vylepšit generátor průběhů tak, aby umožňoval zadání libovolného průběhu v řídicí aplikaci. Tato funkcionality je hardwarově možná, pouze nebyla softwarově implementována z důvodu, že cílem práce je konstrukce osciloskopu, ne generátoru průběhů. Dále by bylo vhodné použít místo převodníku USB-UART USB izolátor, což nebylo provedeno z důvodu značné ceny takového integrovaného obvodu. Aplikaci by bylo možno vylepšit přidáním automatických měření (minimum a maximum signálu apod.).

LITERATURA

- [1] ŠEDIVÁ, Soňa. *Měření v elektrotechnice, prezentace* [online]. Brno: VUT v Brně, 2019 [cit. 2019-11-08]. Dostupné z: IS VUT
- [2] HERRES, David. *How to compensate oscilloscope probes* [online]. 2016 [cit. 2019-11-08]. Dostupné z: <https://www.testandmeasurementtips.com/compensate-oscilloscope-probes/>
- [3] HOROWITZ, Paul a Winfield HILL. *The Art of Electronics*. Third edition. New York: Cambridge University Press, 2017. ISBN 978-0-521-80926-9.
- [4] *Can Your Oscilloscope Capture Elusive Events?* [online]. In: . Keysight Technologies, neznámý, s. 13 [cit. 2019-11-13]. Dostupné z: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5989-7885EN.pdf>
- [5] *Oscilloscope Fundamentals* [online]. USA: Rohde & Schwarz USA [cit. 2019-11-13]. Dostupné z: http://www.rohde-schwarz-usa.com/rs/rohdeschwarz/images/Oscilloscope-Fundamentals_v1.1.pdf
- [6] CAMPBELL, Boon. Real Time or Sampling Oscilloscope. *Keysight Community* [online]. neznámé: Keysight Technologies, 2017 [cit. 2019-11-13]. Dostupné z: <https://community.keysight.com/community/keysight-blogs/oscilloscopes/blog/2017/02/22/real-time-or-sampling-oscilloscope-key-comparisons>
- [7] MARKLEY, Richard. Oscilloscope memory depth: when bigger is not always better. *EE Times* [online]. USA: Agilent Technologies, 2012 [cit. 2019-11-13]. Dostupné z: https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1279463#
- [8] *Computation of Effective Number of Bits, Signal to Noise Ratio, & Signal to Noise & Distortion Ratio Using FFT* [online]. 1. neznámé: Teledyne LeCroy, 2011 [cit. 2019-11-13]. Dostupné z: https://cdn.teledynelecroy.com/files/appnotes/computation_of_effective_no_bits.pdf
- [9] OSTROWSKI, Tomasz. Miniscope v2f. *Tomeko.net* [online]. neznámý [cit. 2019-11-15]. Dostupné z: http://tomeko.net/miniscope_v2f/index.php?lang=en
- [10] BAUER, Dieter. DPScope II. *DPScope - Low-Cost USB Oscilloscopes* [online]. Pfanghofweg, Austria [cit. 2019-11-15]. Dostupné z: http://www.pdamusician.com/dpscope/overview_ii.html
- [11] BAUER, Dieter. DPScope II Specifications. *DPScope - Low-Cost USB Oscilloscopes* [online]. Pfanghofweg, Austria [cit. 2019-11-27]. Dostupné z: http://www.pdamusician.com/dpscope/features_ii.html
- [12] BAUER, Dieter. *DipTrace Schematic - DPScope II* [online]. 1. Pfanghofweg, Austria, neznámý [cit. 2019-11-27]. Dostupné z: http://www.pdamusician.com/dpscope/files/DPScope_II_V2_06_Schematic.pdf
- [13] *ScopeFun – Open Source Oscilloscope* [online]. neznámé, 2019 [cit. 2019-11-27]. Dostupné z: <https://www.scopefun.com/>

- [14] *DIY DSO138 Digital Oscilloscope Solder Kits* | Makerfabs. Makerfabs [online]. 2019 [cit. 2019-11-27]. Dostupné z: <https://www.makerfabs.com/diy-dso138-digital-oscilloscope-solder-kits.html>
- [15] *Datasheet - STM32F303xB STM32F303xC Arm®-based Cortex®-M4 32b MCU* [online]. 14. STMicroelectronics, 2018 [cit. 2019-12-02]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f303cb.pdf>
- [16] *RM0316 Reference Manual* [online]. 8. STMicroelectronics, 2017 [cit. 2019-12-02]. Dostupné z: https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/reference_manual/4a/19/6e/18/9d/92/43/32/DM00043574.pdf/files/DM00043574.pdf/jcr:content/translations/en.DM00043574.pdf
- [17] *ARM Information Center*. ARM [online]. Arm Limited, 2019 [cit. 2019-12-02]. Dostupné z: <http://infocenter.arm.com/help/index.jsp?topic=/com.arm.doc.faqs/ka16366.html>
- [18] *PicoScope® 2000 Series Oscilloscope and MSO Data Sheet* [online]. 2. Cambridgeshire, United Kingdom: Pico Technology, 2016 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <https://www.picotech.com/download/manuals/picoscope-2000-series-data-sheet.pdf>
- [19] *InfiniiVision 1000 X-Series Oscilloscopes Data Sheet* [online]. USA: Keysight Technologies, 2018 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-05520/data-sheets/5992-1965.pdf>
- [20] *AQY282 PhotoMOS RELAYS* [online]. Panasonic Industrial Devices, neznámé [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/315/panasonic_armcs00706-1-1740950.pdf
- [21] *Single-Ended, Rail-to-Rail I/O, Low-Gain PGA MCP6S91/2/3* [online]. USA: Microchip Technology, 2004 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/21908a.pdf>
- [22] *STM32F303xB/C Errata sheet: STM32F303xB/C Rev Z and Y device limitations* [online]. 9. STMicroelectronics NV, 2016 [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: https://www.st.com/resource/en/errata_sheet/dm00063985-stm32f303xbc-rev-z-and-y-device-limitations-stmicroelectronics.pdf
- [23] *Compilation and Execution of a Java Program*. GeeksforGeeks [online]. 2018 [cit. 2020-05-27]. Dostupné z: <https://www.geeksforgeeks.org/compilation-execution-java-program/>
- [24] *How to Install CH340 Drivers*. learn.sparkfun.com [online]. [cit. 2020-05-27]. Dostupné z: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/how-to-install-ch340-drivers/all>

SEZNAM OBRÁZKŮ

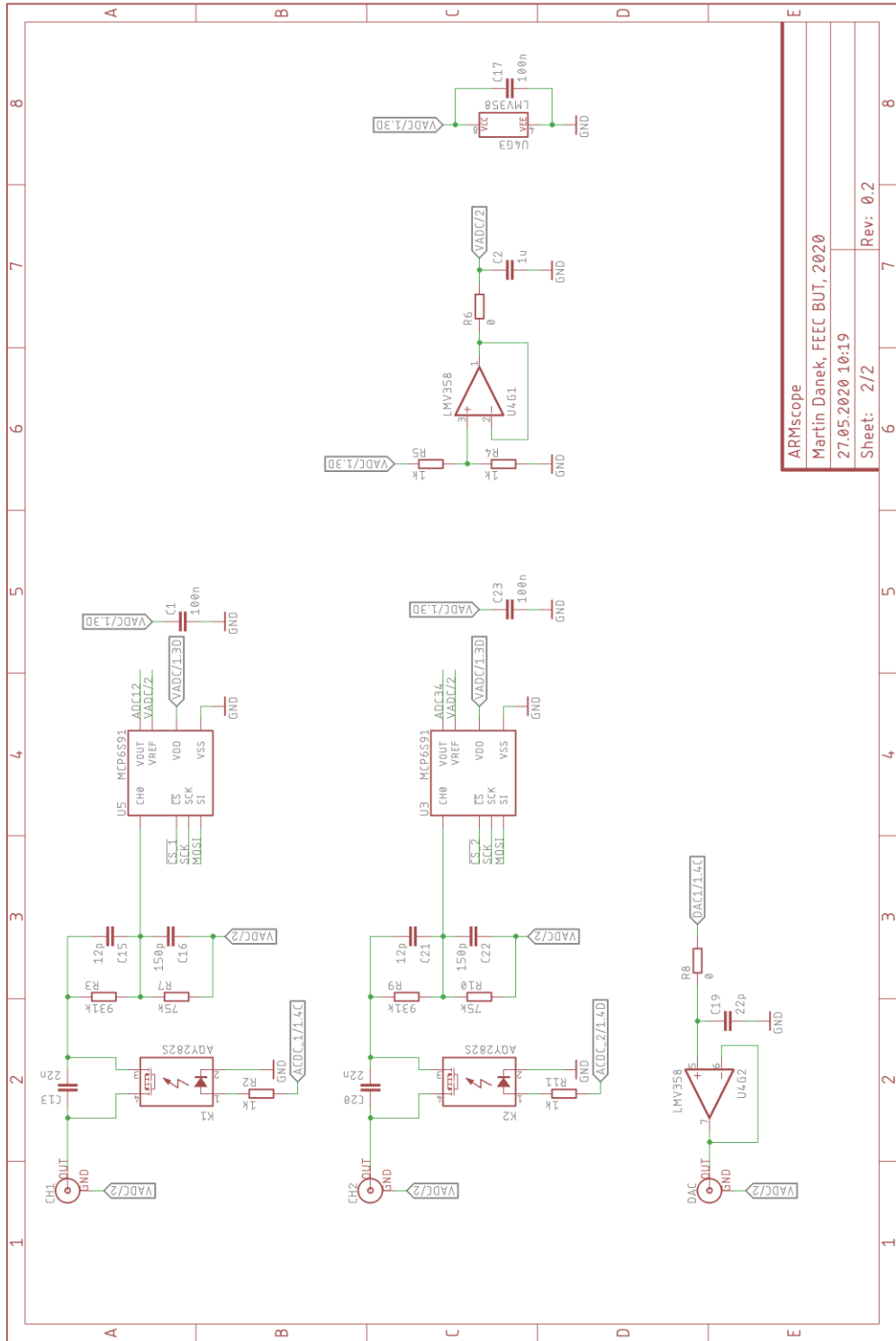
Obrázek 1 Blokové schéma osciloskopu [1].....	3
Obrázek 2 Dělič na vstupu osciloskopu [1]	4
Obrázek 3 Vlevo překompenzovaná sonda, uprostřed nedostatečně kompenzovaná sonda a vpravo ideální průběh [2]	4
Obrázek 4 3bitový paralelní komparační převodník AD [3]	7
Obrázek 5 Postupně konvergující výstup převodníku DA, signál Conversion Complete a časovací signál u SAR převodníku AD [3]	8
Obrázek 6 Efekt "mrtvého času" u digitálního osciloskopu [4]	10
Obrázek 7 Uživatelské rozhraní osciloskopu Agilent Technologies (dnes Keysight) DSO1024A [1]	11
Obrázek 8 Výskyt aliasingu při měření 100Hz průběhu 90 snímky za sekundu [3]	13
Obrázek 9 Schéma MiniScope verze 2f [9]	16
Obrázek 10 Osciloskop DSO138 [14]	17
Obrázek 11 Vstupní analogová část projektu DPScope, včetně prvního zesilujícího OZ [12]	18
Obrázek 12 Analogová vstupní část jednoho kanálu projektu ScopeFun [13]	19
Obrázek 13 Navržené blokové schéma osciloskopu	21
Obrázek 14 Vnitřní schéma vývodu mikrokontroléru, převzato a upraveno z [15]	23
Obrázek 15 Blokové schéma jednoho kanálu osciloskopu	23
Obrázek 16 Schéma jednoho kanálu vstupní analogové části	30
Obrázek 17 Osazená deska zařízení	32
Obrázek 18 Diagram programu mikrokontroléru	35
Obrázek 19 Vývojový diagram programu pro řídicí PC	39
Obrázek 20 Ukázka PC aplikace včetně kurzoru a výběru oblasti	40
Obrázek 21 Finální podoba zařízení	42
Obrázek 22 Graf zesílení při různých frekvencích a amplitudách signálu	43
Obrázek 23 Vyexportovaný průběh obdélníkové a sinusového signálu s frekvencí 100, resp. 200 kHz	44
Obrázek 24 Graf zesílení výstupu generátoru vůči frekvenci	45

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Vybrané parametry mikrokontrolérů rodiny STM32F303 [15].....	22
Tabulka 2 Vybrané parametry OZ MCP6S91 [21].....	29
Tabulka 3 Vstupní rozsahy při různých zesíleních PGA	31
Tabulka 4 Nastavení převodníků AD	33
Tabulka 5 Shrnutí dosažených parametrů osciloskopu.....	45

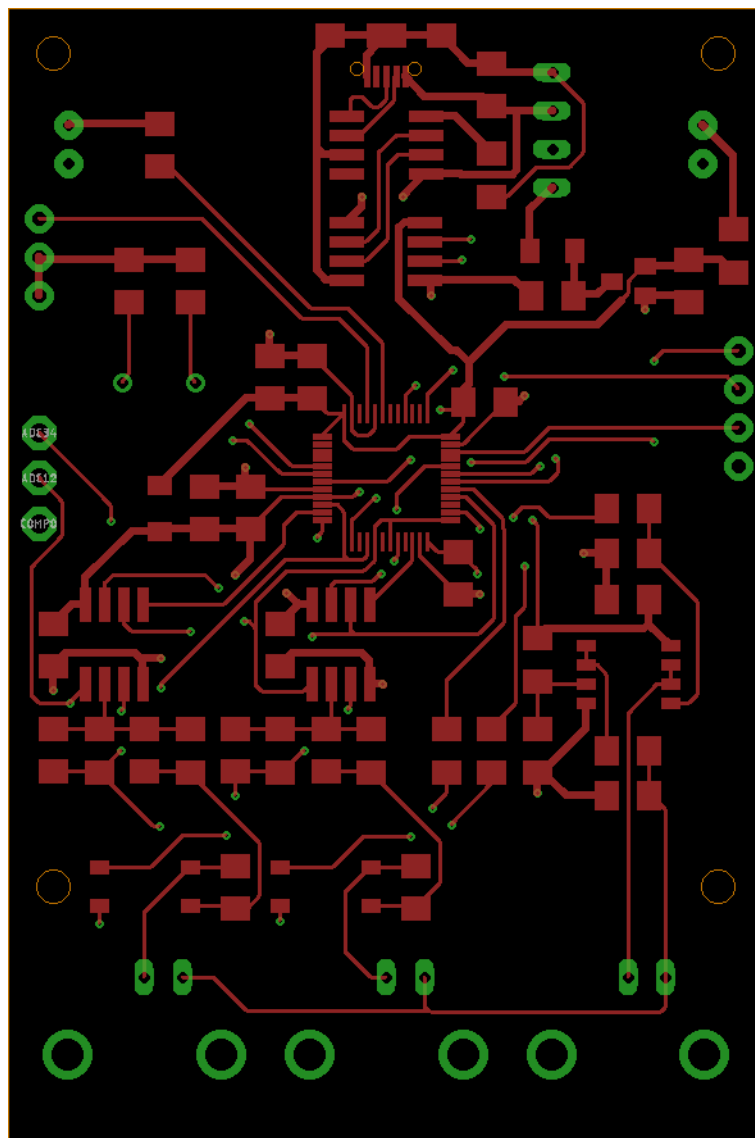
A.1 Obvodové zapojení řídicího modulu





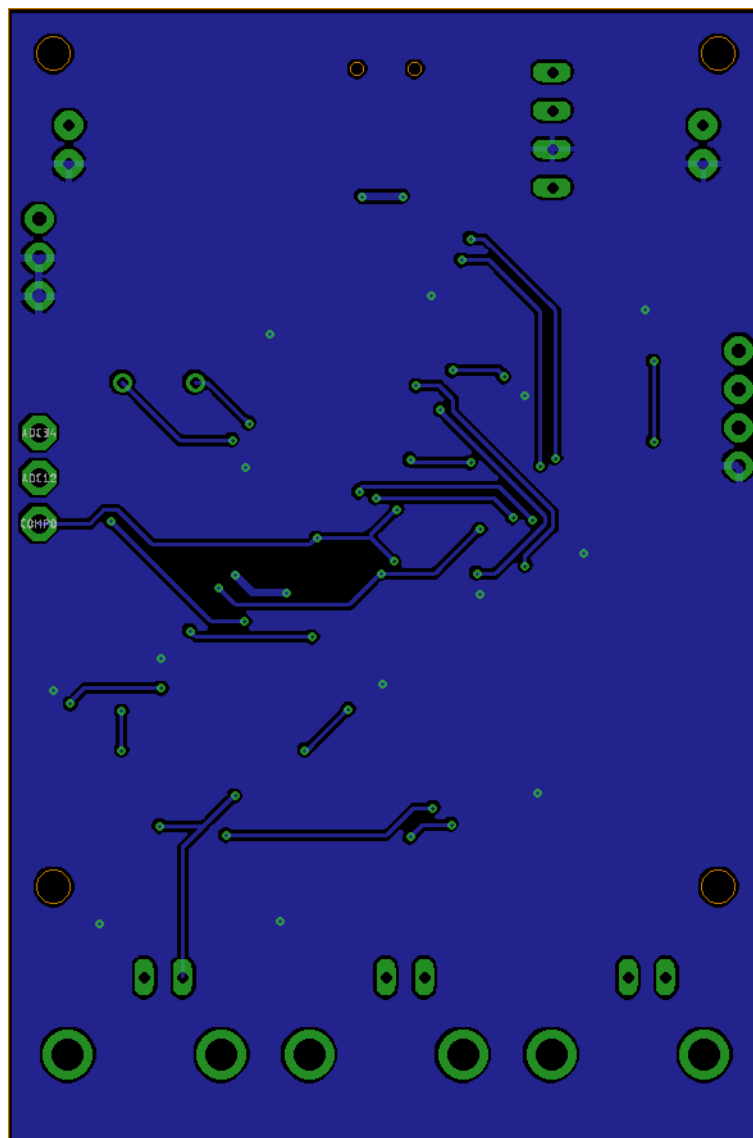
ARMscope	
Martin Danek, FEEC BUT, 2020	
27.05.2020 10:19	
Sheet: 2/2	Rev: 0.2

A.2 Deska plošného spoje – top (strana součástek)



Rozměr desky 50 x 75 mm, měřítko M2:1

A.3 Deska plošného spoje – bottom (strana spojů)



Rozměr desky 50 x 75 mm, měřítko M2:1

B SEZNAM SOUČÁSTEK

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1	100n	C1206	Keramický kondenzátor
C2	1u	C1206	Keramický kondenzátor
C3	100n	C1206	Keramický kondenzátor
C4	10u	C1206	Keramický kondenzátor
C5	22p	C1206	Keramický kondenzátor
C6	22p	C1206	Keramický kondenzátor
C7	10u	C1206	Keramický kondenzátor
C8	100n	C1206	Keramický kondenzátor
C9	100n	C1206	Keramický kondenzátor
C10	100n	C1206	Keramický kondenzátor
C11	1u	C1206	Keramický kondenzátor
C12	10n	C1206	Keramický kondenzátor
C13	22n	C1206	Keramický kondenzátor
C14	10u	C1206	Keramický kondenzátor
C15	12p	C1206	Keramický kondenzátor
C16	150p	C1206	Keramický kondenzátor
C17	100n	C1206	Keramický kondenzátor
C18	10u	C1206	Keramický kondenzátor
C19	22p	C1206	Keramický kondenzátor
C20	22n	C1206	Keramický kondenzátor
C21	12p	C1206	Keramický kondenzátor
C22	150p	C1206	Keramický kondenzátor
C23	100n	C1206	Keramický kondenzátor
CH1	BNCPTH	BNC	Pravoúhlý BNC konektor
CH2	BNCPTH	BNC	Pravoúhlý BNC konektor
D1	oranžová	LED_5MM	LED dioda
D4	modrá	LED_5MM	LED dioda
DAC	BNCPTH	BNC	Pravoúhlý BNC konektor
DC1	CRE1S0505SC	NME	Izolovaný DC-DC měnič
IC1	MCP1700-30	SOT23	Napěťový regulátor
IC2	ADUM1201	SO-08	Digitální izolátor
J1		USB-AB-MICRO-SMD	Mikro USB konektor
K1	AQY282S	SOP04	PhotoMOS relé
K2	AQY282S	SOP04	PhotoMOS relé
L1	1,8u	L3216C	Feritová tlumivka
L2	1,8u	L3216C	Feritová tlumivka
Q1	8M	HC49U-V	Krystal

R1	220	R1206	Rezistor
R2	1k	R1206	Rezistor
R3	931k	R1206	Rezistor
R4	1k	R1206	Rezistor
R5	1k	R1206	Rezistor
R6	0	R1206	Rezistor
R7	75k	R1206	Rezistor
R8	0	R1206	Rezistor
R9	931k	R1206	Rezistor
R10	75k	R1206	Rezistor
R11	1k	R1206	Rezistor
R12	220	R1206	Rezistor
SQW		1X03	Hřebínkový konektor
SWD		1X04	Hřebínkový konektor
TP1		P1-13	Testovací vývod
TP2		P1-13	Testovací vývod
TP3		P1-13	Testovací vývod
U1	CH330	SO08	Převodník USB-UART
U2	STM32F303CBT6	LQFP-48	Mikrokontrolér
U3	MCP6S91	SO08	OZ s nastavitelným zesílením
U4	LMV358	SO08	OZ
U5	MCP6S91	SO08	OZ s nastavitelným zesílením